

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FIBRA ÓPTICA
POLIMÉRICA INSERIDA EM BLOCOS DE ARGAMASSA**

Thiago dos Santos Henriques

Porto Alegre
2013

THIAGO DOS SANTOS HENRIQUES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FIBRA ÓPTICA
POLIMÉRICA INSERIDA EM BLOCOS DE ARGAMASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico.

Porto Alegre
2013

THIAGO DOS SANTOS HENRIQUES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FIBRA ÓPTICA
POLIMÉRICA INSERIDA EM BLOCOS DE ARGAMASSA**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 21 de novembro de 2013.

Prof. Ângela Borges Masuero
Dra. pela UFRGS
orientadora

Prof. Denise Carpena C. Dal Molin
Dra. pela Universidade de São Paulo
orientadora

Prof. Armando Miguel Awruch, Dr.
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ana Paula Kirchheim (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Bernardo Fonseca Tutikian (UNISINOS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Helio Adão Greven (UFRGS)
Dr. Ing. Pela Universidade de Hannover - Alemanha

CIP - Catalogação na Publicação

Henriques, Thiago dos Santos
Análise da Influência da Fibra Óptica Polimérica
Inserida em Blocos de Argamassa / Thiago dos Santos
Henriques. -- 2013.
180 f.

Orientadora: Ângela Borges Masuero.
Coorientadora: Denise Carpena C. Dal Molin.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-
RS, 2013.

1. concreto translúcido. 2. fibra óptica. 3.
propriedades mecânicas. I. Masuero, Ângela Borges,
orient. II. Dal Molin, Denise Carpena C., coorient.
III. Título.

Dedico este trabalho à minha família e principalmente à minha madrinha Thélma (meu anjo)
pelo apoio, sempre!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer à minha família por sempre me dar condições suficientes para eu seguir adiante nos meus objetivos. Estou longe de ser uma pessoa exemplar, mas tento ser o melhor que posso.

Agradeço também aos professores de extrema competência e qualidade do Norie: Eduardo Isatto, Ana Paula Kirchheim, Luis Carlos Bonin (obrigado pelas diversas discussões positivas e vontade de compartilhar seu conhecimento em diversos os tipos de assuntos) e em especial ao Miguel Sattler, Ângela Masuero e Denise Dal Molin. A visão holística e das possibilidades que cada um de nós pode trabalhar a fim de viver de uma maneira mais harmoniosa e integrada com o meio ambiente do professor Sattler é de extrema inspiração. Denise Dal Molin, minha orientadora, agradeço pelos diversos conselhos de sabedoria durante o meu trabalho quando as coisas pareciam não ter solução e por mostrar caminhos onde seguir no meu projeto. Obrigado por acreditar no meu tema de pesquisa! E também quero dizer obrigado à minha outra orientadora, Ângela Masuero, por cobrar e exigir de mim o máximo para o desenvolvimento deste trabalho. Não fosse isso talvez eu ainda estivesse desenvolvendo o meu programa experimental.

Aos colegas e amigos da sala de materiais: Anderson, Giselle Reis, Luciana Cordeiro, Mauro Mário, Eugênio Bastos, Laís Zuchetti, Guilherme Hoehr, Carina Stolz, Daniel Pagnussat, Cris Vitorino, Ju Senisse, Abrahão Rohden. Todos vocês, pelo menos em algum momento, tiveram importância e influência no meu trabalho de pesquisa.

Aos amigos das outras linhas de pesquisa do Norie: Rê Fontaneli, Raquel Reck, Gabi Giacobbo, Ana Kamura, Vivian Ecker, Juliana Parise, Santiago Muñoz, Amanda Gehrke e demais que talvez tenha deixado de fora aqui... Um muito obrigado, pelos momentos de trabalho e descontração no ambiente do Norie e também pelos churrascos, encontros, viagens e festas juntos!

Quero agradecer aos bolsistas de iniciação científica: Vanessa Cappellesso, Caroline Giordani, Juliana Koltermann, Anne Dal Bello, Josi Manini, Bruno Lansini, Gabriela Duarte, Guilherme Anacleto (Formiga), Allan, Edson, Felipe Bianchin. Obrigado pessoal pela

disponibilidade de me auxiliar quando era necessário e também pela paciência com as placas de acrílico com fibra óptica. Aprendi muito com vocês também.

Quero agradecer também à Ana Luisa, do PPGEC, pela extrema competência no seu trabalho. Obrigado pela boa vontade e gentileza em atender aos meus pedidos de compras para a pesquisa.

A Ágatha pela diversão, companheirismo, inúmeras viagens e passeios que me fizeram esvaziar a mente e refletir um pouco sobre tudo.

Aos amigos do Laboratório do Norie ou mais recentemente LAMTAC, Aírton e Gilmar pela paciência, disponibilidade, boa vontade e parceria de me ajudar nos diversos momentos ao longo desses dois anos e meio de mestrado. Quero agradecer pelos diversos momentos de descontração e risadas nos churrascos das sextas-feiras.

Ao NORIE/UFRGS, como instituição pública de primeira linha, por me acolher e todas as pessoas, colegas e amigos que me acompanharam e ajudaram neste período de pós-graduação que talvez não tenha colocado o nome aqui.

E, finalmente quero agradecer ao povo brasileiro por pagar seus impostos e desta forma permitir que eu pudesse ter acesso a um local de alta qualidade de estudo, pesquisa, trabalho, bem equipado e que possui professores qualificados e com vontade de transmitir suas experiências e conhecimentos. Posso dizer que tive iniciativa para começar este Mestrado e “acabativa” (determinação e persistência para terminar o que comecei). Meu compromisso de retribuição com os contribuintes que me patrocinaram até aqui está quitado com a conclusão desta pesquisa.

“Mulheres - com elas uma encrenca, mas sem elas não se pode viver.”

Ayrton Senna

RESUMO

HENRIQUES, T. S. **Análise da influência da fibra óptica polimérica inserida em blocos de argamassa.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Criado em 2001 e patenteado com o nome LiTraCon (Light Transmitting Concrete), o concreto translúcido é um material inovador que proporciona uma quebra de paradigma na utilização de matrizes à base de cimento. Apesar de ser chamado originalmente de concreto translúcido, o material é constituído por uma mistura de argamassa com adição de FOP (fibra óptica polimérica). Um aspecto ainda desconhecido é o efeito desta adição na mistura. Segundo a própria empresa fabricante, o material atinge altas resistências à compressão, entretanto não é mencionado qualquer comparativo com um testemunho, sem a adição de fibra. O principal questionamento levantado neste trabalho é se as boas propriedades mecânicas do material translúcido obtido não poderiam ser atribuídas a um traço rico em cimento ao invés da adição de FOP? Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a influência estética e mecânica da fibra óptica polimérica em blocos de argamassa. Dessa forma foram executadas diferentes famílias de blocos translúcidos variando o teor (0; 2; 3,5 e 5%) e o tipo de organização (ordenado ou aleatório) das FOP's. Atualmente, são poucos os trabalhos na literatura estrangeira que possuem dados técnicos e comparativos, sendo de difícil acesso. A grande maioria são publicações limitando-se a dizer que o material é inovador, com resistência à compressão e tração satisfatórias e suas diversas aplicações tanto na construção civil, quanto na arquitetura de interiores. Os resultados obtidos mostraram que a adição da FOP estatisticamente, em relação ao corpo de prova testemunho (0% de fibra), diminuiu a resistência à compressão, tração na flexão e aumentou a absorção de água por capilaridade. Entretanto, esta minoração das propriedades mecânicas não impossibilita a adoção do material na construção civil (para compósitos com até 5% de fibra óptica polimérica), pois os CP's ainda continuaram com um comportamento considerado satisfatório. Este trabalho pretende contribuir para ampliar o conhecimento deste novo material para aqueles que pretendem reproduzi-lo na indústria nacional.

Palavras-chave: concreto translúcido; fibra óptica; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

HENRIQUES, T. S. **Análise da influência da fibra óptica polimérica inserida em blocos de argamassa.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Analysis of the influence of polymer optical fiber inserted into mortar blocks

Created in 2001 and patented under the name LiTraCon (Light Transmitting Concrete), translucent concrete is a material that provides a paradigm shift in the use of cement-based matrices. Despite being originally called translucent concrete, the material is made of a mixture of mortar with addition of POF (polymer optical fiber). A still unknown is the effect of this addition into the mix. According to the manufacturer, the material reaches high strength to compression, however is not mentioned any comparison with a witness, without the addition of fiber. The main question raised in this paper is whether the good mechanical properties of translucent material obtained could be attributed to a rich mixture in cement instead of an addition of POF. This research has as main objective to evaluate the mechanical and aesthetic influence of polymer optical fiber in mortar blocks. In this way were performed different families of translucent blocks varying the content (0; 2; 3.5 and 5%) and organization (ordered or random) of POF's. Currently, there are few articles in the foreign literature that have technical and comparative data, being difficult to access. The vast majority are publications telling that the material is innovative, with good resistance to compression and traction and its various applications in civil construction and interior architecture. The obtained results showed that the addition of POF statistically, relative to the body of evidence testimony (0 % of fiber), decreased resistance to compression, traction on flexion and increased water absorption by capillarity. However, this decrease of the mechanical properties do not preclude the adoption of the material in civil construction (for composites with up to 5% of polymer optical fiber), because the samples still continued with a behavior considered good. This work aims to contribute to broaden the knowledge of this new material for those who want to manufacture it in the national industry.

Keywords: translucent concrete; optical fiber; mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) vista geral da imagem de uma pessoa através de um protótipo do concreto translúcido; (b) visual do efeito de translucidez obtido; (c) detalhe do material aparentemente opaco (Fonte: http://www.litracon.hu/projects.php# , acessado em 17/05/2012).....	21
Figura 2: protótipo do concreto translúcido: (a) com iluminação posterior ligada; (b) com iluminação posterior desligada.	23
Figura 3: portão Europa na cidade húngara de Komáron: (a) monumento à noite; (b) monumento durante o dia. (Fonte: http://www.litracon.hu/gallery-window.php?parentType=project&parentId=9 , acessado em 18/05/2012)	25
Figura 4: Pantheon (Roma): (a) fachada principal; (b) vista interna da cúpula; (c) efeito da iluminação no interior.....	26
Figura 5: cúpula do Parlamento alemão (Berlim): (a) vista do exterior; (b) vista interna da cúpula; (c) detalhes dos espelhos reflexivos.....	27
Figura 6: Instituto do Mundo Árabe (Paris): (a) vista do exterior; (b) vista do ambiente interno com o efeito de iluminação; (c) detalhe das aberturas. (Fonte: http://www.imarabe.org , acessado em 22/11/2012).....	27
Figura 7: fases de construção de um ninho de João-de-barro: (a) início com auxílio de fibra; (b) detalhe da fase inicial; (c) detalhe da fase intermediária; (d) detalhe da fase final. (Fonte: http://notivaga2010.wordpress.com/author/notivaga2010/page/52/ , acessado em 09/06/2012).....	33
Figura 8: Mecanismo de concentração de tensões na tração no extremo das fissuras	35
Figura 9: Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões (adaptado de NUNES e AGOPYAN, 1998).....	35
Figura 10: ensaio de abatimento de tronco de cone: (a) sem a presença de fibras; (b) após a adição de fibras Kevlar (BERNARDI, 2003).....	36
Figura 11: adição de fibras de aço em uma matriz cimentícia: (a) conjunto de fibras de aço; (b) dificuldade na mistura das fibras de aço no concreto; (c) “ninho” de fibras formado durante o processo de mistura.....	38
Figura 12: Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão (FIGUEIREDO, 2000).....	47
Figura 13: Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre elas e o agregado graúdo (adaptado de FIGUEIREDO, 2000).....	49
Figura 14: Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre elas e o agregado graúdo (adaptado de FIGUEIREDO, 2000).....	49
Figura 15: diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO, 2000).....	52
Figura 16: Evolução histórica da atenuação das FOP, da década de 1960 até o ano de 2000, em função do material constituinte do núcleo (ZUBIA e ARRUE, 2001).....	58
Figura 17: diversos mecanismos que podem causar perdas de transmissão nas fibras (adaptado de CHEN, 1996).....	62

Figura 18: espectro de perdas para fibras de polimetilmetacrilato - PMMA (POLISHUK, 2006).....	62
Figura 19: espectro de perdas para fibras de polímeros fluoretados - CYTOP (POLISHUK, 2006).....	63
Figura 20: estrutura molecular do monômero: (a) polimetilmetacrilato - PMMA; (b) poliestireno - PS; (c) policarbonato – PC (URIBE, 2010).....	65
Figura 21: estrutura e funcionamento da FOP: (a) composição; (b) propagação de onda através do núcleo.....	66
Figura 22: Fluxograma do programa experimental.....	69
Figura 23: diagrama de método de pesquisa.....	70
Figura 24: luminária de origem chinesa com a base separada do feixe de fibras ópticas.	76
Figura 25: Microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado e pertencente ao CME/UFRGS.....	78
Figura 26: Textura superficial da FOP obtida por MEV (elétrons secundários). Magnificação: 150 vezes.	79
Figura 27: Diâmetro médio das FOP obtido por MEV (elétrons secundários). Magnificação: 75 vezes.	79
Figura 28: Amostras de FOP fixadas verticalmente com fita de carbono no <i>stub</i> (indicação, através de setas, da posição de cada uma das fibras).....	80
Figura 29: influência superficial do corte com tesoura obtida por MEV (elétrons secundários): (a) amostra 01; (b) amostra 02. Magnificação: 160 vezes.....	81
Figura 30: influência superficial do corte com estilete obtida por MEV (elétrons secundários): (a) amostra 01; (b) amostra 02. Magnificação: 160 vezes.....	81
Figura 31: influência superficial do corte obtida por MEV (elétrons secundários): (a) amostra 01; (b) amostra 02. Magnificação: 160 vezes.....	82
Figura 32: fôrma para produção de um bloco translúcido com fibras ordenadas: (a) transpasse das fibras; (b) bloco durante a desfôrma (BECKER <i>et. al.</i> , 2010).....	82
Figura 33: produção de blocos translúcidos com fibras aleatórias: (a) fôrma utilizada para a confecção; (b) bloco translúcido antes do corte (MARQUETTO e TUTIKIAN, 2011).	83
Figura 34: análise da FOP: (a) espectrômetro Spectrum BX FTIR utilizado nos ensaios; (b) amostra sendo analisada pelo leitor de infravermelho.....	84
Figura 35: espectro de infravermelho na FOP.....	84
Figura 36: ensaio de tração na FOP: (a) equipamento utilizado; (b) FOP sendo tracionada. ..	86
Figura 37: Apresentação do traço fixo da argamassa utilizada (em massa).....	88
Figura 38: ensaio realizado de determinação do índice de consistência - NBR 13276 (ABNT 2005): (a) preenchimento do molde com argamassa; (b) medição do espalhamento da mistura.	89
Figura 39: ensaio realizado de densidade de massa e do teor de ar incorporado - NBR 13278 (ABNT, 2005): (a) pesagem inicial do molde vazio e placa de vidro utilizada; (b) compactação de argamassa no molde metálico.	90
Figura 40: processo de organização das FOP's nas placas de acrílico: (a) inserção das fibras na placa; (b) preparo da ponta da fibra para o seu travamento; (c) e (d) disposição final das FOP's nas placas.	91

Figura 41: processo de colocação das fibras nos moldes metálicos: (a) utilização de silicone para vedar qualquer tipo de abertura; (b) fixação e respectiva vedação de peça de compensado naval no molde metálico; (c) sistema em repouso por pelo menos 24 horas para a moldagem dos CP's.....	92
Figura 42: resultado dos dois métodos de moldagem experimentados: (a) corpo de prova com FOP executado através do método convencional (horizontal); (b) corpo de prova com FOP feito através do sistema proposto (vertical).....	93
Figura 43: aparelho, desenvolvido na pesquisa, para a vibração por imersão na argamassa ...	93
Figura 44: execução dos compósitos: (a) moldagem dos CP's prismáticos com fibras ordenadas; (b) detalhe de como foi feita a vibração.	94
Figura 45: confecção do CP com fibras ordenadas: (a) corpo de prova logo após a desmoldagem; (b) corte através de serra de apenas uma das faces do CP prismático..	95
Figura 46: fôrma dimensionada para o exato comprimento da FOP disponível.	95
Figura 47: moldagem “por camadas” dos CP's com fibras aleatórias: (a) colocação da camada de FOP; (b) colocação da camada de argamassa.	96
Figura 48: corte do bloco através de serra.	96
Figura 49: equipamento ultrassônico utilizado nos testes: (a) calibração no aparelho feita antes dos ensaios; (b) medição do pulso ultrassônico nos CP's de argamassa.	98
Figura 50: Prensa hidráulica utilizada nos ensaios de resistência dos CP's de argamassa.	99
Figura 51: Esquema demonstrando o sentido em que as cargas foram aplicadas para cada um dos dois tipos de ensaios nos CP's prismáticos.	100
Figura 52: ensaio de absorção de água por capilaridade: (a) etapa inicial de preparar o corpo de prova com lixa grossa; (b) etapa em que o CP é mantido em contato com a água e têm sua massa verificada após 10 e 90 min.	102
Figura 53: projeto do equipamento para medir a transmitância de luz: (a) artefato com fonte luminosa, corpo de prova e luxímetro; (b) dimensões estipuladas.	103
Figura 54: preparação do ensaio para transmitância de luz: (a) vista do aparato inteiro com a adaptação de posição do sensor fotométrico; (b) detalhe da adaptação feita para melhorar a precisão de medição do luxímetro.	104
Figura 55: resistência média à compressão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.....	108
Figura 56: resistência média à tração na flexão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.	110
Figura 57: absorção média de água por capilaridade dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.	113
Figura 58: MEV por elétrons secundários da interface fibra/matriz com a indicação de vazios existentes. Magnificação: 160 vezes.....	114
Figura 59: MEV por elétrons secundários da aglutinação de fibras com indicação de presença de vazios na interface fibra/matriz. Magnificação: 160 vezes.....	115
Figura 60: Transmitância de luz dos corpos de prova com e sem adição de fibras.....	117
Figura 61: Módulo de elasticidade dos corpos de prova com e sem adição de fibras.....	118
Figura 62: metro cúbico da argamassa translúcida: (a) bloco 4,5 x 4,5 x 0,05m; (b) bloco 2,0 x 2,0 x 0,25m.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades das fibras e das matrizes cimentícias (adaptado de HANNANT, 1978 <i>apud</i> LAMEIRAS, 2007).....	40
Tabela 2: classificação das fibras naturais de acordo com a sua categoria de origem.	45
Tabela 3: Caracterização dos diferentes tipos de fibras utilizadas como reforço em matrizes cimentícias (BENTUR E MINDESS, 1990).	53
Tabela 4: Comparação entre fibra óptica polimérica, fibra óptica de vidro e fio de cobre (POLISHUK, 2006).	60
Tabela 5: Fatores de perdas e limites de atenuação teórica para as FOP's com diferentes núcleos (adaptado de ZUBIA e ARRUE, 2001).	64
Tabela 6: Caracterização* física do cimento CP V	71
Tabela 7: Caracterização* química do cimento CP V	71
Tabela 8: Caracterização* mecânica do cimento CP V	72
Tabela 9: Caracterização física do agregado miúdo.	73
Tabela 10: Caracterização físico-química do aditivo	74
Tabela 11: Caracterização química da sílica ativa	75
Tabela 12: Caracterização física da sílica ativa	75
Tabela 13: Análise das bandas do espectro de infravermelho obtido das FOP's.	85
Tabela 14: Ensaio individuais de resistência à tração das FOP's.	86
Tabela 15: Índice de consistência na argamassa para o traço fixo adotado.	105
Tabela 16: Densidade de massa e teor de ar incorporado para o traço fixo adotado.....	106
Tabela 17: Resistência média à compressão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.....	107
Tabela 18: ANOVA da resistência à compressão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.	107
Tabela 19: Resistência à tração na flexão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.	109
Tabela 20: ANOVA da resistência à tração na flexão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.....	110
Tabela 21: Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.....	112
Tabela 22: ANOVA da absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias.	112
Tabela 23: Transmitância média de luz dos corpos de prova com e sem adição de fibras no estado endurecido.	115
Tabela 24: ANOVA da transmitância de luz dos corpos de prova com e sem adição de fibras.	116
Tabela 25: Módulo dinâmico de elasticidade médio dos corpos de prova com e sem adição de fibras no estado endurecido.	117
Tabela 26: ANOVA do módulo dinâmico de elasticidade dos corpos de prova com e sem adição de fibras.	118
Tabela 27: Síntese dos principais comportamentos dos corpos de prova com e sem adição de fibras	120
Tabela 28: Síntese da significância estatística das variáveis e suas interações	121
Tabela 29: quantitativo das FOP's utilizadas nos dois blocos translúcidos de 1m ³	122
Tabela 30: caracterização física da fibra ótica polimérica utilizada.....	122
Tabela 31: custos dos blocos translúcidos.....	123

LISTA DE ABREVIATURAS

- a/c – relação água/cimento
- a/agl – relação água/aglomerante
- A/L – relação água/ligante
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACI - *American Concrete Institute*
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- Ca(OH) – Hidróxido de Cálcio
- CCI – Concreto com cura interna
- CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul
- CME – Centro de microscopia eletrônica
- CP – Corpo de prova
- CRC - Concreto com retração compensada
- CRR – Concreto com retração reduzida
- CYTOP – Polímero fluoretado amorfo
- DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre
- EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- FOP – fibra óptica polimérica
- FOV – Fibra óptica de vidro
- GRC – *Glass Reinforced Concrete*
- IC – índice de consistência da argamassa
- LABCON – Laboratório de conforto ambiental
- LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física
- LAMTAC - Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído
- LASOM - Laboratório de Síntese Orgânica e Medicinal
- Lc – Comprimento crítico
- L/d – Relação de aspecto (comprimento/diâmetro)
- LiTraCon - *Light Transmitting Concrete*
- MEV – Microscópio eletrônico de varredura
- MO – Microscópio óptico
- NORIE – Núcleo Orientado de Inovação na Edificação
- PC - Policarbonato
- PMMA – Polimetilmetacrilato
- POF – *Polymer Optical Fiber*

PP - Polipropileno

PSA – Polímeros Super Absorventes

PS – Poliestireno

PUNDIT – *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*

PVA – acetato de polivinila

RBS TV – Rede Brasil Sul de Televisão

STF – Supremo Tribunal Federal

TiO₂ - Óxido de titânio

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UNIVATES – Unidade Integrada Vale do Taquari de Ensino Superior

USP – Universidade de São Paulo

UVA – Universidade Estadual Vale do Acaraú

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Importância da pesquisa e breve histórico.....	21
1.2	Pioneirismo do concreto translúcido no Brasil pelo Prof. Hélio Greven	23
1.3	Concretos especiais.....	24
1.4	Contextualização	24
1.4.1	Exemplos análogos com alta tecnologia de iluminação empregada.....	26
1.4.2	Pesquisas brasileiras na área.....	28
1.5	Justificativa da pesquisa	28
1.6	Objetivo da pesquisa.....	29
1.6.1	Objetivos específicos da pesquisa	29
1.7	Estrutura da pesquisa	30
2	O USO DA FIBRA.....	31
2.1	Definições básicas	31
2.2	Considerações de caráter histórico e gerais	31
2.3	Função das fibras nas matrizes cimentícias.....	34
2.4	Materiais compósitos estruturados com fibras	36
2.5	Matrizes cimentícias com fibras	38
2.6	Tipos de fibras e propriedades.....	38
2.6.1	Fibras Metálicas.....	41
2.6.2	Fibras de vidro	42
2.6.3	Fibras sintéticas	43
2.6.4	Fibras Naturais.....	44
2.7	Parâmetros que atuam em matrizes cimentícias reforçadas com fibras	46
2.7.1	Teor de fibras	46
2.7.2	Geometria das fibras	47
2.7.3	Distribuição e orientação das fibras	49
2.7.4	Resistência mecânica e módulo de elasticidade das fibras.....	50
2.8	Zona de transição fibra-matriz.....	53
3	A FIBRA ÓPTICA POLIMÉRICA (FOP)	56
3.1	Histórico de desenvolvimento	57
3.2	Comparação, com vantagens e desvantagens, das FOP's em relação aos outros tipos de fibras	58
3.3	Perdas de transmissão	60
3.4	Composição e estrutura química dos polímeros	64
3.5	Composição estrutural das fibras ópticas	65

4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	67
4.1	Metodologia de pesquisa	70
4.2	Materiais empregados no estudo	70
4.2.1	Cimento	71
4.2.2	Agregado miúdo	72
4.2.3	Aditivo	73
4.2.4	Adição.....	74
4.2.5	Água.....	75
4.2.6	FOP	76
4.2.6.1	Propriedades e desempenho.....	76
4.2.6.2	Caracterização superficial – MEV	77
4.2.6.3	Textura superficial	78
4.2.6.4	Diâmetro.....	79
4.2.6.5	Influência qualitativa do tipo de corte nas FOP's.....	80
4.2.6.6	Espectroscopia no Infravermelho.....	83
4.2.6.7	Desempenho mecânico	85
4.2.6.8	Recomendações em relação ao manuseio	87
4.2.6.9	Emprego na construção civil.....	87
4.3	Caracterização da argamassa no estado fresco	88
4.3.1	Índice de consistência	88
4.3.2	Densidade de massa e teor de ar incorporado	89
4.4	Método de execução dos corpos de prova de argamassa.....	90
4.4.1	Método de preparo dos CP's com fibras ordenadas.....	90
4.4.1.1	Moldagem dos corpos de prova com fibras ordenadas	92
4.4.2	Método de preparo para execução dos CP's com fibras aleatórias	95
4.4.2.1	Moldagem dos corpos de prova com fibras aleatórias	96
4.5	Procedimentos adotados no período pós-moldagem dos CP's.....	97
4.5.1	Ensaio de módulo dinâmico de elasticidade	97
4.5.2	Ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão	98
4.5.2.1	Sentido da carga aplicada.....	99
4.5.3	Ensaio de absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.....	100
4.5.4	Ensaio transmitância de luz.....	102
5	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	105
5.1	Caracterização da argamassa utilizada na confecção dos corpos de prova.....	105
5.1.1	Caracterização no estado fresco	105
5.1.1.1	Índice de consistência.....	105
5.1.1.2	Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	106
5.1.2	Caracterização no estado endurecido.....	106

5.1.2.1	Resistência à compressão.....	106
5.1.2.2	Resistência à tração na flexão	109
5.1.2.3	Absorção de água por capilaridade	111
5.1.2.4	Interação fibra-matriz.....	113
5.1.2.5	Transmitância de luz.....	115
5.1.2.6	Módulo de elasticidade dinâmico	117
5.1.2.7	Síntese da caracterização dos blocos no estado endurecido	119
5.2	Cálculo dos custos aproximados dos blocos translúcidos	121
6	CONCLUSÕES.....	124
6.1	Sugestões para futuros trabalhos	125

1 INTRODUÇÃO

O homem constrói sua própria moradia e outras estruturas, desde a pré-história, incluindo pontes, anfiteatros, barragens, postes de eletricidade, estradas e canais. Materiais de construção em uso atual têm uma longa história e ainda algumas estruturas construídas há milhares de anos podem ser consideradas como notáveis. A história da construção se mistura com a própria engenharia estrutural. O aperfeiçoamento de invenções desenvolvidas guiou o conhecimento do ser humano em um caminho de outras novas descobertas mais engenhosas e complexas, as quais podem ser identificadas em diferentes épocas da História. O desenvolvimento da construção civil é um assunto complexo, abrangendo a origem e progresso dos materiais, técnicas construtivas, situação econômica e social dos construtores e operários, entre outros. Cada assunto tem a sua própria literatura complexa dedicada.

As primeiras pontes feitas por seres humanos foram provavelmente toras de madeira colocadas sobre um fluxo de água. Os primeiros edifícios eram simples cabanas, barracas e abrigos para atender as necessidades básicas de proteção contra elementos naturais e fenômenos climáticos, construída pelos seus habitantes. Os abrigos mais simples, como as tendas, não deixaram quase nenhum traço arqueológico. A ausência de ferramentas metálicas gerava limitações sobre os materiais que poderiam ser trabalhados, mas ainda era possível construir estruturas de pedra bastante elaboradas com engenhosidade, usando técnicas de parede ou muro feito de pedra-seca, por exemplo.

Inicialmente, o desenvolvimento dos materiais ocorreu muito lentamente. Ao longo do tempo, com o aperfeiçoamento de técnicas primitivas e com o desenvolvimento de novos conhecimentos, em determinado período da história surge a argamassa e, posteriormente, o concreto. Tornando-se mais exigente com o passar do tempo, o Homem vai desenvolvendo uma rede maior de necessidades a serem supridas em todas as suas variedades. Dessa forma, no campo da construção civil, também vão sendo adicionados vários elementos na matriz cimentícia, ampliando os resultados para diversos e novos materiais com melhor estética, resistência e durabilidade.

Nas últimas décadas, uma ampla quantidade de técnicos e pesquisadores em todo o mundo vêm dedicando seu tempo em estudos e desenvolvimento de materiais relacionados ao

cimento e seus derivados (pastas, argamassas e concretos). Ainda assim, em uma realidade cada vez mais dominada pela tecnologia de smartphones, TV's 3D, tablets, entre outros, ainda restam lacunas no conhecimento relacionado aos materiais cimentícios.

1.1 Importância da pesquisa e breve histórico

Hoje, um dos grandes desafios no momento do planejamento de uma estrutura para o uso humano é equalizar suas características de proteção, resistência, ductilidade e iluminação natural. Trazer para o campo prático da construção civil estes conceitos é um desafio constante para proposição de algumas alternativas. Criado há apenas dez anos na Europa, o concreto translúcido é um material inovador que proporciona uma quebra de paradigma na utilização de matrizes à base de cimento.

Áron Losonczy, arquiteto húngaro, é o pioneiro mundial responsável por desenvolver de forma eficaz e viável, a partir de 2001, este novo tipo de material, chamado originalmente de LiTraCon (Light Transmitting Concrete). É um elemento que, segundo informações do seu website (www.litracon.hu), possui resistência mecânica semelhante ao concreto convencional e, devido ao material adicionado, permite visualizar as silhuetas do lado oposto. Na Figura 1 verifica-se o efeito estético e visual causado por uma parede de concreto translúcido.

Figura 1: (a) vista geral da imagem de uma pessoa através de um protótipo do concreto translúcido; (b) visual do efeito de translucidez obtido; (c) detalhe do material aparentemente opaco (Fonte: <http://www.litracon.hu/projects.php#>, acessado em 17/05/2012).



Uma questão importante a ser esclarecida é quanto à nomenclatura do material. Apesar de ser chamado de concreto translúcido, o LiTraCon é, originalmente, constituído por uma mistura de argamassa com adição de fibra óptica não sendo utilizado, portanto, agregado graúdo. Como exemplos de concretos que não utilizam agregado graúdo, podem ser citado o concreto celular e o concreto reforçado com fibra de vidro (GRC). De acordo com a NBR 7200 (ABNT, 1998), argamassa é definida como:

mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerantes(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento

Acredita-se, então, que a razão para esse material ser chamado de concreto translúcido pela empresa que originalmente o desenvolveu seja para efeitos de marketing, a fim de causar maior impacto na sua divulgação.

Muitas mudanças na indústria da construção vêm ocorrendo, sendo provocadas principalmente pelo aumento do nível de exigência dos seus principais clientes e usuários, normas brasileiras mais rígidas e também pela demanda mais diversificada e específica do setor. De acordo com Repette (2005), o LiTraCon é um inegável e grande avanço no campo da construção civil.

Em outros países do mundo, o LiTraCon vem sendo adotado aos poucos tanto para ambientes internos quanto externos. No Brasil, o material original da empresa húngara não é importado em escala significativa devido ao seu custo elevado.

Um aspecto ainda desconhecido do LiTraCon, que simplificada é apenas uma argamassa com adição de FOP (fibra óptica polimérica), é o efeito desta adição na mistura. Segundo a própria empresa, o material pode atingir altas resistências à compressão, entretanto não é mencionado qualquer comparativo com um testemunho, sem a adição de fibra. Da mesma forma, o teor adotado no material original é único, 4% em volume, não havendo uma análise do comportamento com outros teores. As boas propriedades mecânicas do LiTraCon poderiam, por exemplo, ser consequência de um traço rico em aglomerantes ou baixa relação a/agl.

Assim sendo, devem ser investigadas a priori algumas composições de FOP que possibilitem que o material atenda os seus requisitos estéticos de transmitância de luz, tentando preservar ao máximo suas propriedades mecânicas. A fim de garantir a translucidez proposta sem tornar a argamassa translúcida um material de baixo desempenho, é essencial obter uma mistura

bastante fluida e coesa ao mesmo tempo, facilitando o preenchimento dos espaços entre as fibras. Para atingir essa meta é essencial o emprego de aditivos plastificantes ou superplastificantes na composição do traço, visando o objetivo final: garantir a utilização de teores seguros e eficientes de FOP em placas de argamassas translúcidas.

1.2 Pioneirismo do concreto translúcido no Brasil pelo Prof. Hélio Greven

O pioneiro na introdução desta tecnologia no conhecimento técnico-científico no país é o Prof. Dr. Hélio A. Greven, do Núcleo Orientado de Inovação na Edificação (NORIE) da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) que em 2006 produziu o concreto translúcido no Brasil conjuntamente com o Engenheiros Henrique Deboni, Giovani Deboni e Sílvio Brescovit nas dependências da Empresa Verdi Construções, em Canoas/RS. Estes blocos (Figura 2) de concreto translúcido foram produzidos para a Exposição de 50 anos de existência da RBS TV na Usina do Gasômetro em Porto Alegre em 2007 onde foi montada uma parede com aprox. 3,00 x 3,00m configurando a visão de futuro que era a proposta da mostra. Nas dependências do NORIE se encontra um segmento de parede contendo blocos de concreto translúcido produzidos em 2006 e que registram o ineditismo da tecnologia no Brasil.

Figura 2: protótipo do concreto translúcido: (a) com iluminação posterior ligada; (b) com iluminação posterior desligada.



Posteriormente dois centros de pesquisas, um na UVA (Universidade Estadual do Vale do Acaraú) e outro na UNIVATES (Unidade Integrada Vale do Taquari de Ensino Superior), vêm desenvolvendo, desde 2008, estudos sobre o concreto translúcido. Na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), o trabalho desenvolvido por Uribe (2010) procurou fundamentalmente avaliar a durabilidade das FOP's inseridas nas matrizes cimentícias.

1.3 Concretos especiais

O concreto convencional, feito com cimento Portland e agregado natural apresenta diversas deficiências. Tentativas de superar essas deficiências têm resultado no desenvolvimento de concretos especiais, que representam avanços em tecnologia de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Concretos que podem ser enquadrados no grupo conhecido como de última geração ou especiais são materiais singulares obtidos pela mistura de componentes convencionais e outros ditos não convencionais como, por exemplo, os modernos aditivos químicos. As novas tecnologias desenvolvidas para a elaboração destes novos concretos também procuram satisfazer exigências ambientais e técnicas que muitas vezes não podem ser cumpridas apenas com o uso do concreto convencional.

No campo de concretos especiais produzidos com emprego de elevada tecnologia de técnicas e/ou materiais, podem ser citados o concreto: para isolamento acústico e térmico, permeável, refratário, condutivo, translúcido, entre outros.

1.4 Contextualização

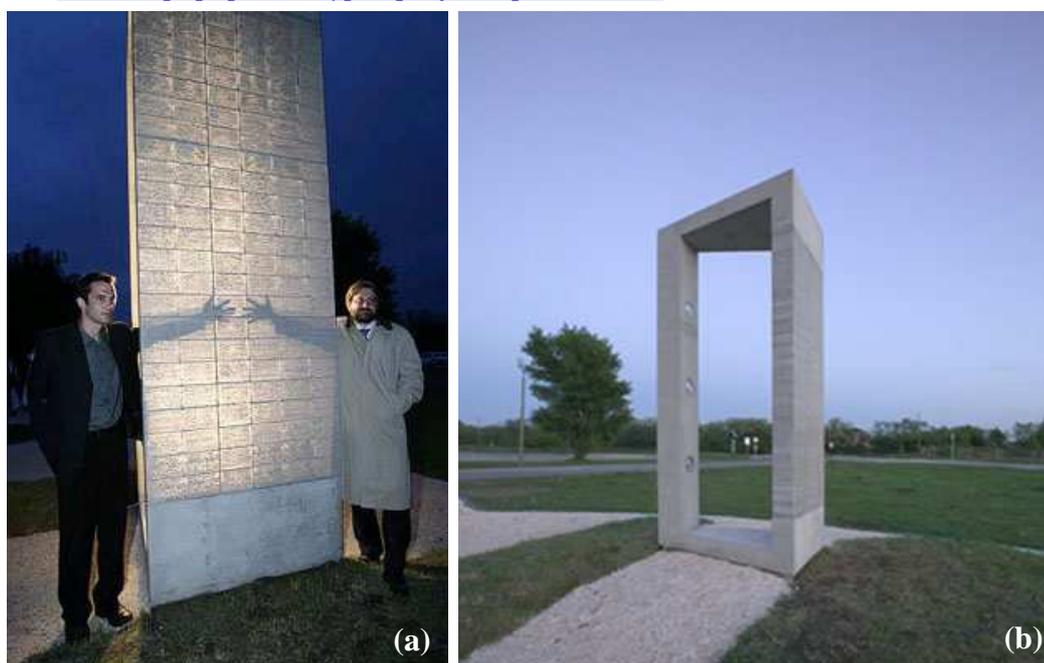
O tema desta dissertação busca inserir-se em um contexto atualmente bastante em evidência na construção civil nos países mais desenvolvidos e nos emergentes: a busca de soluções com melhor desempenho, racionalidade, flexibilidade e segurança para o uso e conforto humano. O concreto translúcido surge como um material de elevado custo e propriedades com poucas publicações técnicas, tornando o conhecimento ainda limitado. No Brasil, a disponibilidade no mercado da sua matéria-prima principal, a fibra óptica, ainda é escassa e consequentemente a produção do material muito limitada, restringindo-se quase totalmente à área acadêmica.

A utilização de placas translúcidas abrange um amplo campo na construção civil. Caso venha a ser produzido em larga escala no Brasil, o concreto translúcido poderá ser utilizado em obras de trânsito, de segurança pública, entre outros. Em Estocolmo, por exemplo, o material já foi aplicado em quebra-molas. Dentro de cada bloco de concreto translúcido foram colocadas LED's (lâmpadas com baixo consumo de energia e alta durabilidade), que acendem ao escurecer e servem de alerta para os motoristas (TUTIKIAN, 2009).

Segundo Tutikian (2009), em Canoas, no Rio Grande do Sul, existe um projeto de presídio modelo com previsão para construção de uma cela experimental com concreto translúcido. O objetivo é conseguir iluminar as celas por dentro das paredes, evitando a possibilidade do detento quebrar as lâmpadas e utilizá-las como arma. De acordo com Repette (2011), as potenciais utilizações para o concreto translúcido são inúmeras tanto no aspecto técnico, como a economia de energia, como no aspecto arquitetônico, deixando as edificações mais iluminadas e belas.

Em ambientes externos, o concreto translúcido ainda pode ser utilizado em praças públicas, transformando-as em um ambiente mais lúdico, possibilitando a interação das pessoas com o material. Na Figura 3, observa-se o Portão Europa, na cidade húngara de Komárom. É um monumento construído com placas translúcidas, celebrando a entrada da Hungria na União Europeia, em 2004.

Figura 3: portão Europa na cidade húngara de Komárom: (a) monumento à noite; (b) monumento durante o dia. (Fonte: <http://www.litracon.hu/gallery-window.php?parentType=project&parentId=9>, acessado em 18/05/2012)



Apesar de ainda estar sendo empregado de forma experimental tanto em espaços fechados, quanto abertos, principalmente nos EUA e Europa, a sua comercialização no Brasil é apenas uma questão de tempo. No momento em que for possível importar ou produzir a FOP no país em grande escala, a tendência é que o custo do material, influenciado principalmente pelo preço da fibra, diminua bastante.

1.4.1 Exemplos análogos com alta tecnologia de iluminação empregada

Um dos grandes desafios no momento do planejamento de uma estrutura para o uso humano é equilibrar requisitos de proteção, resistência e iluminação natural. É uma preocupação de projeto e execução há vários séculos. O Pantheon (também chamado de Basílica Santa Maria dos Mártires), em Roma, teve sua construção original destruída por um incêndio em 80 d.C. Entretanto, entre 118d.C. e 125 d.C. foi reconstruído e hoje é aberto à visitação. (Fonte: adaptado de <http://www.italyguides.it/us/roma/pantheon.htm>).

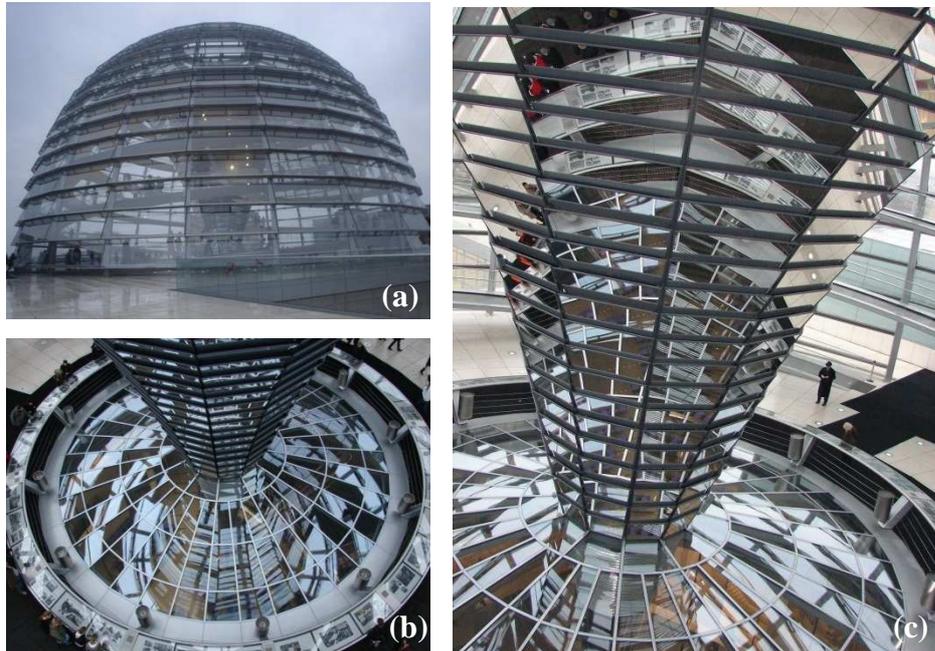
Na Figura 4 observa-se a preocupação dos projetistas há quase 1900 anos a respeito dos requisitos já mencionados. A edificação, através da sua grande cúpula com alvéolos no interior, busca obter uma estrutura mais leve e a entrada direta de luz natural no interior é feita através de uma abertura zenital no topo.

Figura 4: Pantheon (Roma): (a) fachada principal; (b) vista interna da cúpula; (c) efeito da iluminação no interior.



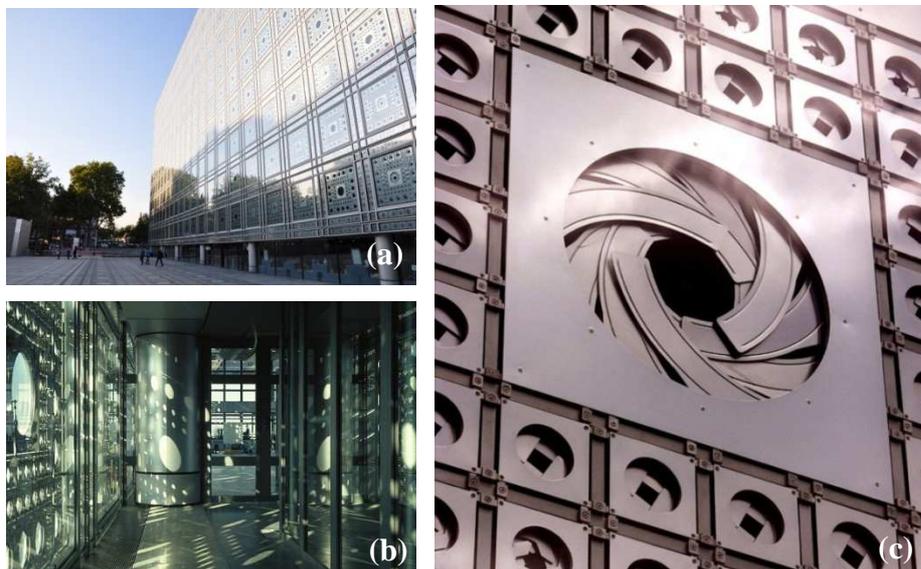
Em Berlim o Palácio do Reichstag, local atual onde o parlamento federal da Alemanha exerce suas funções, teve sua construção original concluída em 1894. A edificação era composta por uma cúpula (anterior a atual) de aço e vidro, uma técnica considerada bastante avançada para a época. Desde a finalização da sua construção o palácio passou por incêndios, 1ª e 2ª Guerra Mundial, além da Guerra Fria. Ao longo desse tempo recebeu reformas e restauros, sendo reinaugurado em 1999 como a nova sede do Parlamento e com uma cúpula completamente nova composta por um funil de espelhos possibilitando uma iluminação homogênea do ambiente interno. Através da Figura 5 observa-se como funciona a iluminação natural por reflexão proporcionada por modernas técnicas e materiais construtivos.

Figura 5: cúpula do Parlamento alemão (Berlim): (a) vista do exterior; (b) vista interna da cúpula; (c) detalhes dos espelhos reflexivos.



Já o Instituto do Mundo Árabe, localizado próximo à Catedral de Notre Dame em Paris, possui as fachadas compostas por painéis metálicos com orifícios retráteis, como se observa na Figura 6. Estes painéis podem ser ajustados a fim de possibilitar o controle de entrada de luz natural nos ambientes internos.

Figura 6: Instituto do Mundo Árabe (Paris): (a) vista do exterior; (b) vista do ambiente interno com o efeito de iluminação; (c) detalhe das aberturas. (Fonte: <http://www.imarabe.org>, acessado em 22/11/2012).



1.4.2 Pesquisas brasileiras na área

A presente pesquisa aborda um tema relativamente recente, o concreto translúcido. Os poucos trabalhos e publicações técnicas existentes sobre o assunto restringem-se basicamente à literatura estrangeira até o momento. No meio acadêmico, no Brasil, foram encontrados trabalhos de pesquisa da UVA e UNIVATES, além da dissertação de mestrado da Universidade Federal de Santa Catarina. No trabalho feito por Uribe (2010), foi produzida uma argamassa translúcida através da adição de fibras ópticas poliméricas (FOP). Foram moldados corpos de prova prismáticos (4x4x16cm) avaliando-se a vulnerabilidade das fibras frente à ação dos álcalis presentes na matriz de cimento Portland hidratado e a sua influência em algumas propriedades físico-mecânicas como absorção de água por imersão, resistência à tração na flexão, condutividade térmica e transmitância de luz.

Os resultados dos experimentos realizados mostraram que a adição de FOP reduziu significativamente a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade das placas. Não foi observada alguma influência por parte das soluções agressivas e dos álcalis presentes na matriz cimentícia na superfície da FOP e sua estrutura (URIBE, 2010).

No trabalho feito por Becker *et. al.* (2010), foi descrito um passo-a-passo sobre os métodos adotados para a confecção dos blocos translúcidos. Na pesquisa desenvolvida por Marquette e Tutikian (2011) foram executadas peças de argamassas translúcidas com diferentes teores adotados de FOP's e posteriormente testadas à absorção de água por capilaridade, a resistência à compressão e a tração na flexão. Já o trabalho apresentado por Coelho (2010) descreveu o método de execução do concreto translúcido adotado pelo autor que inclusive utilizou agregado graúdo na mistura.

1.5 Justificativa da pesquisa

A maior parte das publicações estrangeiras encontradas sobre o concreto translúcido limita-se a dizer que o material é inovador, com resistência à compressão e à tração satisfatórias e citam suas diversas aplicações tanto na construção civil quanto na arquitetura de interiores. Nas poucas publicações técnicas nacionais ainda existem alguns pontos polêmicos sobre a influência de fibra óptica polimérica em blocos de argamassas.

Em relação às referências nacionais encontradas sobre a resistência à compressão e à tração foram encontrados alguns pontos contraditórios. Segundo Marquette e Tutikian (2011), a

adição de FOP piora as propriedades mecânicas de compressão e de tração na flexão do material. Já de acordo com Coelho (2010), as fibras incorporadas melhoram a resistência à compressão, à flexão e torção do concreto translúcido. Segundo Uribe (2010), a adição de FOP diminui a resistência à tração na flexão das placas de argamassa. De acordo com a empresa que desenvolveu o material, a resistência à compressão do concreto translúcido pode chegar a 50 MPa, entretanto não esclarece se este comportamento é consequência da adição da FOP. Um bom comportamento mecânico pode ser obtido por diversos fatores, não necessariamente em função da adição de fibra na matriz.

Já para os aspectos de condutividade térmica e absorção de água são quase inexistentes, até o momento, os trabalhos publicados no país. Segundo Uribe (2010), a adição de FOB diminuiu tanto a condutividade térmica, quanto a absorção de água. Entretanto, estes dois pontos estudados foram para um único teor e diâmetro de fibras.

Em relação à vulnerabilidade das fibras à alcalinidade da matriz de cimento Portland é esperado que, em se tratando de um material polimérico, as fibras ópticas não apresentem degradação quando em ambientes alcalinos. Segundo Uribe (2010), tal fato, através de experimentos realizados, é confirmado.

Como comentado nos itens anteriores, dados técnicos e comparativos sobre este material são escassos e às vezes contraditórios. Dessa forma, o presente trabalho tem como motivação desenvolver uma pesquisa complementar à feita por Uribe (2010) e pretende contribuir para esclarecer e ampliar o acesso ao conhecimento deste novo material para aqueles que pretendem reproduzi-lo na indústria nacional.

1.6 Objetivo da pesquisa

O principal objetivo desta pesquisa é analisar a influência da fibra óptica polimérica inserida em blocos de argamassa.

1.6.1 Objetivos específicos da pesquisa

Os objetivos específicos desta pesquisa consistem em avaliar a influência do teor e modo de disposição das FOP nos compósitos através das seguintes propriedades:

- a) resistência à compressão;
- b) resistência à tração na flexão;
- c) absorção de água por capilaridade;
- d) transmitância de luz.

1.7 Estrutura da pesquisa

No capítulo 1 é descrito um breve histórico sobre a evolução das tecnologias construtivas desde o Homem primitivo até o contemporâneo, evidenciando conseqüentemente a maior complexidade das suas necessidades. São feitas considerações sobre a importância do trabalho e também são apresentados as justificativas, os objetivos, a metodologia e estrutura da pesquisa.

No capítulo 2 são apresentadas as definições básicas das fibras, evidenciando as suas propriedades e classificações. Este capítulo do trabalho tem como objetivo revisar o processo de incorporação de fibras em concretos e argamassas, debatendo as suas vantagens e desvantagens.

No capítulo 3 é apresentada a fibra óptica polimérica, foco desta pesquisa, com discussões sobre a sua composição, seu desempenho mecânico e suas possíveis aplicações no campo da construção civil.

O capítulo 4 demonstra o programa experimental, com ensaios propostos e materiais adotados com o objetivo de analisar o comportamento das fibras ópticas poliméricas inseridas em blocos de argamassa.

No capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados nos blocos de argamassa.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões desta pesquisa, sendo apontadas também sugestões para futuros estudos sobre o assunto abordado.

2 O USO DA FIBRA

Os materiais, em sua grande parte, se apresentam mais resistentes e rígidos quando na forma fibrosa devido à alta relação comprimento-diâmetro e à pequena quantidade de defeitos apresentados. O uso da fibra em materiais compósitos na construção civil tem como objetivo básico servir como reforço, entretanto isso irá depender das características das matrizes e das próprias fibras.

2.1 Definições básicas

Segundo Figueiredo (2011), as fibras podem ser denominadas como elementos não contínuos, com comprimento consideravelmente maior que a seção transversal. De acordo com Santos (2002), uma das premissas necessárias para que um material possa ser considerado como fibra é que o seu comprimento seja, pelo menos, 100 vezes maior do que o seu diâmetro médio.

Fibras podem ser apresentadas tanto na forma de fios, como tecidos. Fios podem ser considerados como um conjunto de fibras entrelaçadas formando cilindros com diâmetro médio bastante inferior ao comprimento. Já os tecidos são formados pelo entrelaçamento ortogonal de um conjunto de fios, compondo assim uma trama. De acordo com Bernardi (2003), as propriedades de um fio são determinadas pelas propriedades da fibra, já as propriedades de uma fibra são determinadas pelas propriedades do material constituinte.

2.2 Considerações de caráter histórico e gerais

A adição de fibras em materiais de construção civil remonta à antiguidade, já que se tem registro deste uso nos primórdios da civilização, com emprego no Antigo Egito e em Roma, onde os adobes e tijolos eram reforçados com raízes. Após o Renascimento tem-se notícias do uso de placas de gesso reforçadas com sisal ou crina de cavalo (AGOPYAN, 1991).

Em tempos mais recentes, o uso comercial em larga escala de fibras de amianto na matriz da pasta de cimento começou com a invenção do processo Hatschek, em 1898. No entanto, principalmente devido a riscos de saúde associados com fibras de amianto, tipos de fibra alternativa foram introduzidos ao longo das décadas de 1960 e 1970. Nos tempos modernos,

uma vasta gama de materiais de construção (incluindo cerâmicas, plásticos, cimentos e produtos de gesso) incorporam fibras para aprimorar as propriedades do material como, por exemplo: resistência à tração, módulo de elasticidade, controle e resistência à fissuração, durabilidade, resistência ao impacto, entre outros (ACI Committee 544, 1996).

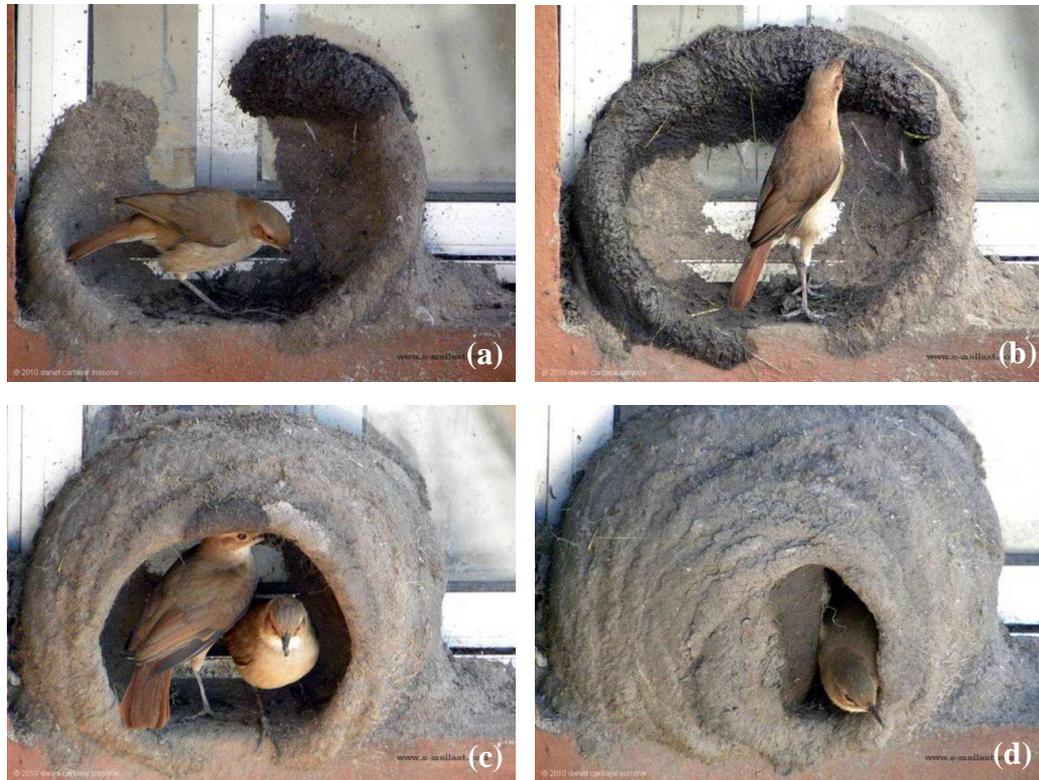
Desde os tempos antigos, as fibras têm sido usadas para reforçar materiais frágeis. A palha era utilizada para reforçar tijolos cozidos ao sol e crinas de cavalos eram usadas para reforçar gessos e argamassas de alvenaria. Acredita-se que a casa Pueblo, construída por volta de 1540, seja a mais antiga nos Estados Unidos, sendo constituída de adobe cozido ao sol e reforçado com palha (ACI Committee 544 , 1996).

De acordo com Exodus 5:6, os egípcios usavam a palha para reforçar tijolos de barro. Há evidências de que as fibras de asbesto foram usadas para reforçar postes de argila há cerca de 5000 anos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O uso das fibras como material de reforço de matrizes frágeis e as principais características dos materiais fibrosos são assuntos de grande interesse. A ideia de adicionar materiais fibrosos para reforçar materiais frágeis é um exemplo que vem da própria natureza. O João-de-barro, por exemplo, usa, de forma bastante eficiente, galhos e folhas de árvores para reforçar a estrutura de barro de seu ninho (BERNARDI, 2003).

Na Figura 7 observam-se as fases de construção de um ninho de João-de-barro. Este é um exemplo encontrado na natureza de utilização de fibra como reforço estrutural.

Figura 7: fases de construção de um ninho de João-de-barro: (a) início com auxílio de fibra; (b) detalhe da fase inicial; (c) detalhe da fase intermediária; (d) detalhe da fase final. (Fonte: <http://notivaga2010.wordpress.com/author/notivaga2010/page/52/>, acessado em 09/06/2012)



Atualmente, no mercado da construção civil nacional, a utilização de fibras adicionadas em matrizes cimentícias é boa uma alternativa de reforço em peças estruturais. Apesar de cada vez mais serem utilizadas uma diversidade maior de tipos de fibras, estas têm a tendência, em geral, de melhorar a ductilidade de materiais cimentícios, diminuindo o surgimento de fissuras com o aumento nas resistências ao impacto, à flexão e à tração.

Segundo Tanesi (1999), as propriedades de matrizes cimentícias reforçadas com fibras dependem do comprimento e do teor das fibras adicionadas, além das características das próprias fibras, da matriz e também da interação fibra-matriz.

O uso de FOP em matrizes cimentícias é inovador e, portanto, o conhecimento do seu comportamento ainda é desconhecido. Por tratar-se de um material de alto custo e disponibilidade limitada no mercado nacional, sua utilização como reforço no âmbito de minimizar as tensões internas ainda não é alvo de pesquisas no Brasil. Entretanto, com o uso de FOP a fim de obter características de translucidez, a sua caracterização e comportamento em argamassas assumem uma importância e foco fundamental neste trabalho.

2.3 Função das fibras nas matrizes cimentícias

Os compósitos de cimento Portland, tanto argamassas quanto concretos, em decorrência da origem e dosagem dos seus principais componentes e também o emprego ou não de aditivos e adições, podem apresentar grande variabilidade nas suas propriedades como, por exemplo, a resistência à compressão. Apesar das matrizes cimentícias possuírem inúmeras qualidades tanto para sistemas estruturais quanto de vedações, estas possuem algumas limitações, por exemplo: considerável menor resistência à tração em relação à compressão, baixa capacidade de deformação, comportamento frágil, entre outros. Uma das alternativas para compensar estas limitações é a utilização de fibras nas misturas.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), antes mesmo de ser submetido a tensões externas, o concreto normalmente possui microfissuras na zona de transição entre a matriz e os agregados graúdos, gerando uma zona frágil para a ruptura do material. De acordo com Garcez (2005), o problema, do ponto de vista microestrutural, consiste no fato de que, quando o concreto é submetido à tração ou à flexão, a energia se concentra rapidamente nas extremidades das microfissuras existentes, gerando um crescimento incontrolado destas e, por consequência, uma ruína frágil do material.

Na construção civil uma das soluções usuais mais empregadas para melhorar o desempenho à tração de matrizes frágeis é a adição de fibras nas misturas. Concretos, argamassas e pastas, por exemplo, podem ser considerados como materiais frágeis, ou seja, que possuem ruptura brusca sem deformação plástica. Este crescente uso de reforço deve-se principalmente à melhora do comportamento mecânico no estado endurecido devido ao aumento da ductilidade, melhora do comportamento pós-fissuração e acréscimo nas resistências mecânicas (à tração, à flexão e ao impacto) que as fibras proporcionam.

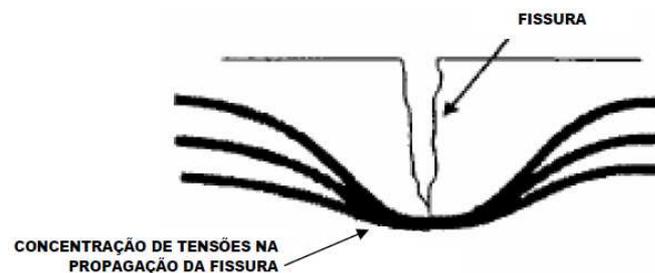
As fibras agem como pontes de transferência de tensões, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das fissuras. Diversas fibras, de diferentes materiais, tais como o aço, o carbono, o vidro, os asbestos, a aramida, o polipropileno, o sisal, o coco e o bambu, podem ser utilizadas como reforço de matrizes cimentícias, agregando a estas diferentes características (GARCEZ, 2005).

Segundo John (1997), algumas vantagens podem ser citadas para o uso de fibras em matrizes frágeis como, por exemplo: melhor desempenho frente aos esforços dinâmicos, a diminuição da velocidade de propagação das fissuras, e o comportamento pós-fissuração, podendo

apresentar uma considerável deformação plástica. De acordo com Figueiredo (2011), a adição de fibras tem como consequência uma melhor tenacidade e ductilidade nas misturas, ou seja, após a fissuração o material ainda continua apresentando uma resistência residual a esforços nele aplicados.

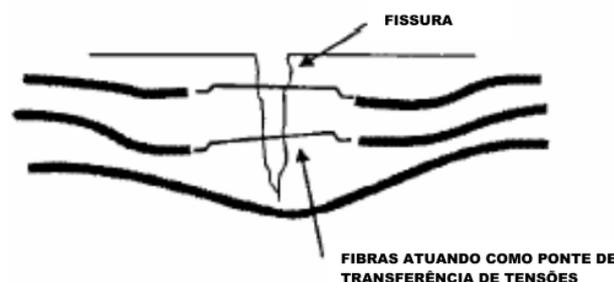
Na Figura 8 é possível observar o comportamento do compósito sem reforço de fibras. A concentração de tensões tende a aumentar cada vez mais a profundidade e a abertura das fissuras.

Figura 8: Mecanismo de concentração de tensões na tração no extremo das fissuras (adaptado de NUNES e AGOPYAN, 1998).



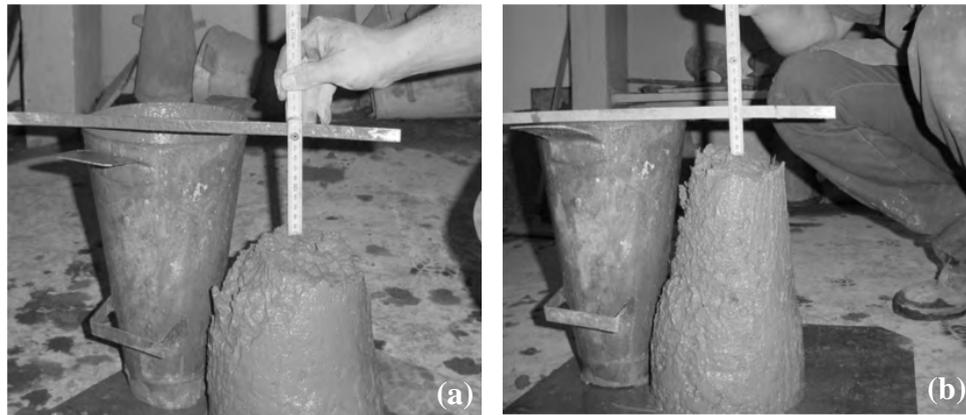
As funções básicas das fibras atuando como reforços podem ser comparadas às das armaduras no concreto armado. Elas atuam suportando e dispersando as tensões e, conseqüentemente, ajudando a evitar maior propagação das fissuras. Na Figura 9 observa-se um compósito reforçado com fibras.

Figura 9: Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões (adaptado de NUNES e AGOPYAN, 1998).



A adição de fibras tem efeitos no estado pós-fissuração ajudando a costurar e interceptar o desenvolvimento de microfissuras, evitando uma ruptura brusca. Apesar de todos os pontos positivos citados, a incorporação de fibras em misturas cimentícias, em geral, tem como consequência diminuição da trabalhabilidade da mistura no estado fresco (Figura 10).

Figura 10: ensaio de abatimento de tronco de cone: (a) sem a presença de fibras; (b) após a adição de fibras Kevlar (BERNARDI, 2003).



Segundo Mehta e Monteiro (2008), a adição de qualquer tipo de fibra no concreto simples reduz a trabalhabilidade e independentemente do tipo de fibra, a perda de trabalhabilidade é proporcional à concentração volumétrica de fibras no concreto. Dessa maneira, o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes torna-se geralmente necessário quando utilizadas micro ou nano fibras a fim de gerar uma dispersão melhor das mesmas nas misturas.

2.4 Materiais compósitos estruturados com fibras

Nos compósitos, os elementos constituintes, apesar de atuarem conjuntamente, mantêm suas identidades individuais, ou seja, não se dissolvem nem se transformam completamente em outros, podendo ser facilmente identificados. O exemplo mais conhecido na construção civil é o concreto. Ele é constituído por três fases principais: a pasta de cimento, os agregados miúdos e os graúdos.

O concreto tem inúmeras vantagens como a capacidade de produzir estruturas com diversas formas. Também é capaz de apresentar uma ampla escala de suas propriedades em função do tipo de componentes principais e de suas proporções, bem como a utilização ou não de uma grande variedade de aditivos e adições. No entanto, apresenta algumas limitações como o comportamento de ruptura frágil e pequena capacidade de deformação quando comparado com outros materiais estruturais como o aço (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A adição de fibras às matrizes cimentícias tem como objetivo funcionar como um reforço, entretanto, isto dependerá da interação das propriedades da própria matriz com as fibras. A

correta utilização de reforço de fibras em função das propriedades dos componentes cimentícios tende, conseqüentemente, a proporcionar a produção de compósitos mais leves e esbeltos e ainda pode diminuir seus custos de produção.

Um compósito estruturado com fibras é formado basicamente por dois componentes: a matriz e o elemento de reforço. A matriz é responsável pela união entre as fibras que formam o compósito e pela transferência de esforços, além de garantir proteção contra o ataque de agentes agressivos do meio ambiente e de danos causados pelo uso (CALLISTER, 2004).

Os primeiros materiais compósitos foram desenvolvidos pela natureza. A madeira é um exemplo de compósito, pois é constituída por fibras de celulose que são envolvidas por resinas. Os ossos também são exemplos de compósitos, pois são formados por cálcio e fibras de colágeno (URIBE, 2010).

Segundo Meneghetti (2007), do ponto de vista da Engenharia, um compósito pode ser considerado como um material multifásico, artificialmente construído, cujas propriedades dependem do tipo, quantidade e arranjo dos materiais que o compõem. A definição e classificação desta nomenclatura precisa ser feita de modo específico, considerando suas diversas aplicações.

O sucesso de qualquer composto reforçado com fibras depende da ligação entre a matriz e a fibra de reforço. Em compósitos cimentícios reforçados com fibras, os mecanismos de ligação são múltiplos e complexos. O entendimento de cada um desses mecanismos pode ajudar na concepção de compósitos com propriedades otimizadas (NAAMAN, 2012).

Um material, por exemplo, que pode ser considerado como um dos primeiros materiais de construção civil reforçado com fibras e produzido em escala comercial, mesmo sem estudos mais aprofundados sobre o seu comportamento é o fibrocimento. Nos países mais desenvolvidos ele começou a ser alvo de maiores pesquisas apenas a partir de 1960.

O fibrocimento consiste numa matriz de pasta de cimento reforçada com fibras de amianto, isto é, dois materiais de características frágeis trabalhando em conjunto. Sua utilização remonta o início do século XX e acabou por se expandir por vários países. Devido às condições de produção, onde o excesso de água é removido da massa por prensagem e filtragem concomitante, é possível dosar as fibras em teores elevados (10% ou mais). O objetivo do elevado teor de fibras é o aumento da capacidade resistente do compósito. Isto é

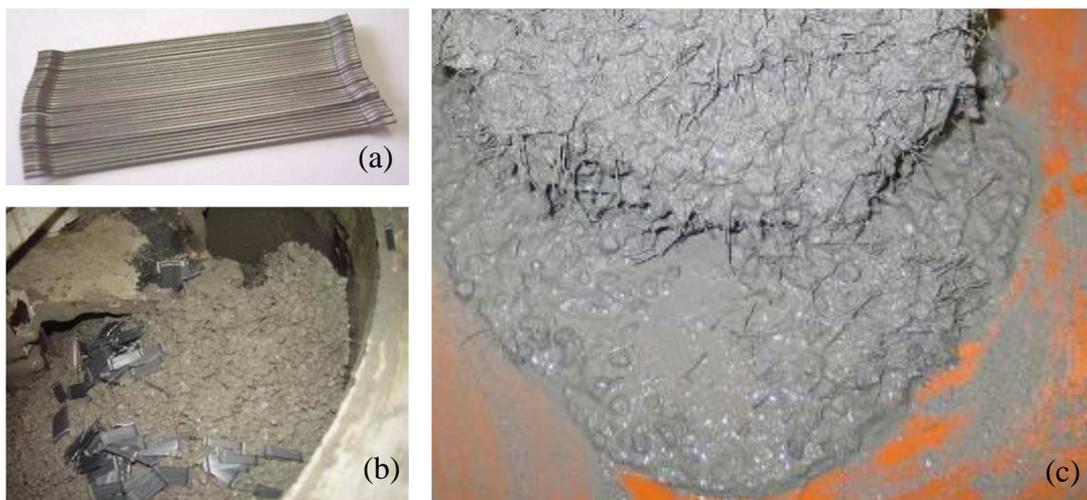
possível graças à elevada resistência e módulo de elasticidade da fibra em conjunto com a elevada aderência que ela desenvolve com a matriz (BENTUR e MINDESS, 1990).

2.5 Matrizes cimentícias com fibras

Entre as melhorias que as fibras proporcionam aos compósitos à base de cimento, podem ser citadas: diminuição da retração das fissuras causadas por retração, redução do surgimento de microfissuras, aumento da resistência ao choque (tenacidade), incremento da ductilidade das peças, entre outros.

Entretanto, a adição de fibras altera as propriedades do concreto no estado fresco, prejudicando-o principalmente na diminuição da sua trabalhabilidade com uma tendência de formação de “ninhos” nas misturas (Figura 11). Dessa forma, no momento da composição de dosagem de compósitos cimentícios, as fibras devem ser consideradas como um novo agregado.

Figura 11: adição de fibras de aço em uma matriz cimentícia: (a) conjunto de fibras de aço; (b) dificuldade na mistura das fibras de aço no concreto; (c) “ninho” de fibras formado durante o processo de mistura.



2.6 Tipos de fibras e propriedades

Apesar de poderem proporcionar diversas vantagens como reforço em matrizes cimentícias, as fibras também possuem características que limitam a sua utilização. Segundo Bassi (2010), o asbesto é cancerígeno; o vidro possui baixa resistência química frente aos álcalis do

cimento; o aço apresenta problemas de corrosão e densidade elevada; o carbono é considerado frágil, possui custo elevado e ainda não tem boa aderência; as fibras vegetais têm pequena durabilidade; o polietileno e o polipropileno comum não são aderentes; entre outros. Entretanto, é necessário ponderar que cada tipo de fibra possui qualidades específicas e pode contribuir diferentemente com a melhoria das propriedades dos compósitos, sendo úteis em determinadas situações. Dessa forma, é necessário estudar e entender cada tipo de fibra como reforço a fim de poder aproveitar ao máximo os seus benefícios.

Diversos tipos de fibras estão sendo utilizadas como reforço em materiais de construção e também solos. As características de comportamento de cada uma delas, as propriedades químicas, físicas e mecânicas, estão intimamente relacionadas ao material do qual são compostas e ao seu processo de fabricação. Portanto, a compreensão do mecanismo de interação matriz-reforço e da parcela de contribuição de cada uma das fases no comportamento do material compósito como um todo é fundamental para a definição do tipo de fibra a ser empregado. Esta definição dependerá fundamentalmente das características da matriz a ser reforçada e das características desejadas do material compósito resultante (DONATO, 2003).

Existem vários tipos de fibras disponíveis para fins comerciais e uso experimental. Os tamanhos, a composição e os tipos de fibras diversificam-se em características como, por exemplo: composição, natureza, aplicação, entre outros. De acordo o ACI 544 (1999), quanto à natureza as fibras podem ser classificadas em quatro categorias principais: fibras metálicas, fibras de vidro, fibras sintéticas e fibras naturais.

- As fibras metálicas (ex. aço) incluem fibras de diversas formas e são muito usadas no mercado mundial;
- As fibras de vidro são fibras cerâmicas que poderiam se enquadrar na categoria das fibras sintéticas, mas devido à sua importância no mercado e características particulares, são classificadas separadamente;
- As fibras sintéticas são aquelas produzidas pelo Homem e que, geralmente, possuem fatores de forma muito menores do que as fibras metálicas. Utilizam como matéria-prima produtos da indústria petroquímica. Dentre elas podem ser citadas as fibras de polipropileno, polietileno, náilon, carbono e aramida;

● As fibras naturais são aquelas encontradas normalmente na natureza, podendo ser retiradas diretamente do meio ambiente. Estas podem ser utilizadas como reforço nos materiais cimentícios com ou sem prévio processamento. Dentre as fibras naturais mais utilizadas pode-se citar: amianto, bambu, sisal, fibra de coco, entre outras.

Na Tabela 1 são apresentados alguns exemplos de fibras de acordo com as suas principais propriedades.

Tabela 1: Propriedades das fibras e das matrizes cimentícias (adaptado de HANNANT, 1978 *apud* LAMEIRAS, 2007).

Material	Diâmetro Equivalente (μm)	Massa Específica (g/cm^3)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na Ruptura (%)	
FIBRA	Amianto	0,1 – 20	1,90	1800	380	Aprox. 0,5
	Acrílico	12,7 – 104,1	1,16 – 1,18	268,9 – 999,8	13,8 – 19,3	-
	Aço	10 - 330	7,86	2100	160	Aprox. 3,0
	Aramida I	11,9	1,44	2930,4	62,1	-
	Aramida II	10,2	1,44	2344,3	117,2	-
	Carbono I	7,6	1,90	1723,7	379,9	-
	Carbono II	8,9	1,90	2620,1	230,3	Aprox. 1,0
	Nylon	22,9	1,14	965,3	5,2	Aprox. 13,5
	Poliéster	19,8	1,34 - 1,39	227,5 – 1103,2	17,2	-
	Polietileno	25,4 - 1016	0,92 – 0,96	75,8 – 586,1	50,0 – 117,2	-
	Polipropileno	-	0,90 – 0,91	137,9 – 689,5	3,4 – 4,8	-
	Vidro – AR	-	2,70 – 2,74	2447,7 – 2482,2	78,6 – 80,0	Aprox. 3,6
	Vidro – E	-	2,46 – 2,54	3102,7 – 3447,5	64,8 – 71,7	Aprox. 3,6
	Côco	101,6 – 406,4	1,12 – 1,15	120,0 – 200,0	19,0 – 26,0	-
	Sisal	-	-	275,8 – 586,1	13,0 – 26,0	-
Bagaço de Cana	203,2 – 406,4	1,20 – 1,30	183,7 – 289,6	15,0 – 19,0	-	
MATRIZ	Pasta de Cimento	-	2,00 – 2,20	3 - 6	10 - 25	Aprox. 0,01 – 0,05
	Argamassa	-	2,20 – 2,30	2 - 4	25 - 35	Aprox. 0,005 – 0,015
	Concreto	-	2,30 – 2,45	1 - 4	30 - 40	Aprox. 0,005 – 0,015

¹ HANNANT, D. J. Fiber cements and fiber concretes. Guildford. John Wiley & Sons. United Kingdom. 1978.

Como pode ser observado na Tabela 1, o alongamento na ruptura de todas as fibras é cerca de duas a três ordens de magnitude maior do que a deformação na falha da matriz cimentícia. Conseqüentemente, nos compósitos, a matriz fatura muito antes da resistência da fibra ser atingida (HANNANT, 1978 *apud* LAMEIRAS, 2007).

Apesar de serem usados nas edificações há vários séculos, os materiais fibrosos no campo da Engenharia aeronáutica, bélica, mecânica e aeroespacial desenvolveram-se bastante após a Segunda Guerra Mundial. Assim sendo, grande parte das pesquisas foram realizadas com base em matrizes poliméricas e metálicas (KERN, 1999).

Vários componentes de ligação contribuem para a relação entre a tensão de ligação e a resposta de deslizamento de uma fibra, entre eles estão (NAAMAN, 2012):

- a) adesão (física ou química) se existente – é assumida como uma ligação frágil (com uma camada adesiva extremamente fina) e desaparece quando o atrito cinemático começa;
- b) atrito cinemático - uma vez que começa a fricção cinemática, três possíveis respostas podem ser observadas: atrito constante, fricção decadente e fricção de endurecimento, respectivamente;
- c) ligação mecânica (ou ancoragem) – é o componente de ligação que aumenta significativamente a resistência de arrancamento da fibra através da deformação da própria fibra. Tal deformação geralmente possui duas formas possíveis, uma localizada e outra distribuída ao longo de todo o comprimento da fibra;
- d) bloqueio de fibra a fibra - Quando a fração de volume de fibras é relativamente alta e as fibras são longas e rígidas, elas tendem a formar redes interconectadas. Em tal sistema, as fibras travam-se umas as outras dentro dessa rede de fibras, criando um componente de vínculo ativo.

2.6.1 Fibras Metálicas

Dentro do grupo das fibras metálicas, as que são feitas de aço, em geral, são as mais utilizadas como reforço em matrizes cimentícias. Entretanto, dependem do local onde estão sendo utilizadas, pois podem apresentar problemas referentes à corrosão. Um método para evitar este tipo de inconveniência é o uso de fibras de aço galvanizado, de aço inoxidável ou ainda

² HANNANT, D. J. Fiber cements and fiber concretes. Guildford. John Wiley & Sons. United Kingdom. 1978.

com banho com níquel. A utilização desse tipo de fibra como reforço é bastante ampla, pois estas possuem uma grande variedade de comprimentos e formas dependendo do processo de fabricação. Assim sendo, podem estruturar elementos com pouca espessura. Segundo o ACI 544,1R-96 (1996), grande parte das pesquisas usam as fibras de aço como reforço provavelmente por estarem disponíveis no mercado com maior variedade de formatos do que o restante. De acordo com Donato (2003), em geral as fibras metálicas apresentam uma resistência à tração de aproximadamente 200GPa.

Entre as diversas vantagens que as fibras metálicas proporcionam ao concreto está o aumento do mecanismo de absorção de energia obtido através da relação de aderência fibra-matriz e como consequência maior resistência à tração do compósito. De acordo com Pereira (2002), as fibras de aço são usadas, principalmente, como reforço no concreto, para controle da fissuração, substituindo a armadura secundária utilizada em lajes de edifícios, pavimentos rígidos e revestimentos de túneis, como também em recuperações de estruturas.

O Brasil conta com norma de especificação para fibras de aço para concreto, a NBR 15530 (ABNT, 2007). Ela estabelece parâmetros de classificação para as fibras de aço de baixo teor de carbono e dispõe sobre os requisitos mínimos de forma geométrica, tolerâncias dimensionais, defeitos de fabricação, resistência à tração e dobramento.

2.6.2 Fibras de vidro

A fibra de vidro utilizada como reforço estrutural em matrizes cimentícias é um material formado pela aglomeração de filamentos de vidro extremamente finos e muito flexíveis. No compósito ela tende a proporcionar principalmente um aumento da resistência à tração, flexão e ao impacto. Segundo Bernardi (2003), a fibra de vidro é um material que surgiu como alternativa para reforçar o concreto, de forma a produzir um compósito que poderia substituir o cimento amianto.

De acordo com Micali (2010), entre as principais vantagens do uso da fibra de vidro na construção civil podem ser citados: baixa absorção de água, custo e coeficiente de dilatação térmica; boa resistência ao impacto; alta resistência à tração; não ser combustível, entre outros. Entretanto, segundo o mesmo autor, como aspectos desfavoráveis as fibras de vidro possuem grande sensibilidade em meios alcalinos e menor resistência quando submetidas às ações de fadiga. Para Peruzzi (2002), embora as fibras de vidro sejam confeccionadas com material frágil (vidro) elas possuem propriedades satisfatórias para serem empregadas na

construção civil como, por exemplo, a facilidade de processamento além de não serem passíveis de inalação, o que representa uma grande vantagem se comparada ao amianto.

As fibras de vidro são produzidas a partir da sílica (SiO_2), através da adição de óxido de cálcio, boro, sódio e alumínio. Estas fibras são materiais amorfos e sua cristalização ocorre após prolongado tratamento com altas temperaturas. Dentre as diversas qualidades pode ser destacado que é um produto com fabricação no Brasil (FIORELLI, 2002).

A pouca durabilidade de fibras de vidro utilizadas como reforço em matrizes cimentícias é geralmente atribuída a sua inadequada resistência ao meio alcalino. Esta desvantagem gera por consequência uma minoração das propriedades mecânicas, fazendo com que a fibra de vidro convencional perca sua flexibilidade e sua resistência à tração, fragilizando assim todo o compósito. Segundo Purnell *et al.* (2000), para contornar a degradação das fibras de vidro no meio alcalino das matrizes cimentícias existem duas hipóteses: melhoria da tecnologia de resistência das fibras através do uso da fibra de vidro AR (álcali resistente) ou modificação das matrizes cimentícias. De acordo com Garcez (2005), as primeiras pesquisas realizadas sobre desempenho da fibra de vidro, por volta de 1960, mostraram que a fibra de vidro convencional, à base de óxido de boro (E glass), apresentava baixa resistência aos álcalis presentes na matriz de cimento Portland, o que levou ao desenvolvimento de fibras de vidro especiais, resistentes a esses álcalis, chamadas AR glass (álcali resistant glass).

As fibras de vidro, no caso das matrizes cimentícias, geralmente são adicionadas para produção de elementos estruturais de seção delgada, especialmente painéis de fechamento. A função das fibras, nesses casos, é de promover maior estabilidade dimensional e aumentar a resistência à tração e o módulo de elasticidade nas idades iniciais (BENTUR e MINDESS, 1990).

2.6.3 Fibras sintéticas

Os concretos e argamassas com adições de fibras sintéticas (polipropileno e nylon) funcionando como reforço são exemplos de compósitos com crescente escala de aplicação no Brasil nos últimos vinte anos. No país já existem diversos fabricantes destas fibras com a finalidade de servir como um reforço secundário do concreto.

As fibras sintéticas são derivadas de polímeros orgânicos, resultantes de pesquisas desenvolvidas na indústria petroquímica e têxtil. Entre as principais fibras sintéticas estão as

fibras acrílicas, de poliamidas aromáticas (aramida), de nylon, de poliéster, de polietileno, de polipropileno e de carbono. Parte desta variedade de fibras é pouco utilizada no reforço de matrizes cimentícias por falta de viabilidade no mercado da construção civil ou porque ainda não foram objetos de muitas pesquisas. Outras, entretanto, são facilmente encontradas no mercado e suas propriedades e uso são extensivamente estudados, destacando-se as fibras de aramida e polipropileno.

Um dos principais usos da fibra sintética está voltado para os pavimentos industriais. A fibra é adicionada à matriz cimentícia geralmente em baixos teores com a finalidade de controlar a fissuração por retração, substituindo assim o emprego das telas metálicas. De acordo com Pereira (2002), a substituição de telas metálicas por fibras sintéticas pode ser justificada pelo ganho de produtividade, uma vez que elimina o tempo para a disposição e fixação de telas, além do seu custo ser compensado pelo custo global das telas.

As fibras de aramida apresentam alto módulo de elasticidade. Quando adicionadas às matrizes cimentícias, na forma de pequenos segmentos, apresentam ótimo desempenho especialmente no aumento da rigidez, resistência ao impacto e flexão dos compósitos. Em geral, os teores de adição ficam na faixa entre 1 e 5% do volume do concreto ou argamassa (BENTUR e MINDESS, 1990).

Já as fibras de polipropileno apresentam baixo módulo de elasticidade, grande capacidade de deformação, boa resistência aos álcalis e baixo custo. Elas costumam ser utilizadas para o controle da microfissuração em estruturas de grande área superficial, tais como pisos industriais e pavimentos, sendo recomendadas adições inferiores a 0,3% do volume. Também podem ser utilizadas na fabricação de seções delgadas a teores máximos de 5% do volume, com uso de técnicas especiais de produção de argamassa (BENTUR e MINDESS, 1990).

Entretanto, apesar de serem utilizadas como um material de reforço em compósitos cimentícios, as fibras de polipropileno apresentam reduzida resistência à tração. Dessa forma, se comparadas com outras fibras, seus resultados não são muito significativos em termos de incremento de resistência como reforço de concretos sujeitos a cargas de impacto.

2.6.4 Fibras Naturais

O grupo das fibras naturais pode ser dividido em três categorias: fibras vegetais, animais e minerais. Para cada categoria existem diferentes tipos de origem das fibras (Tabela 2).

Tabela 2: classificação das fibras naturais de acordo com a sua categoria de origem.

Origem vegetal			Origem animal		Origem mineral
Fruto	Talo	Folhas	Lã e pêlos	Seda	
Algodão, coco	Linho, malva, bambu, juta, cana de açúcar, piaçava	Sisal, tucum, capim elefante	Coelho, ovelha, cabra, camelo	Cultivada (<i>bombix mori</i>), silvestre (<i>tussah</i>)	Amianto (asbesto)

Na fabricação de um determinado produto envolvendo fibras naturais é fundamental o conhecimento das características da fibra constituinte do processo. No caso das fibras vegetais, suas características são afetadas por diversas variáveis, como irrigação, seleção de sementes, hibridação e melhoria dos métodos de cultivo. Já para as fibras animais, a melhoria da vacinação e cuidados na criação são algumas das variáveis que controlam a melhoria na obtenção das melhores fibras. A variação dessas características influencia na qualidade da fibra e, conseqüentemente, no seu valor de comercialização (BERNARDI, 2003).

Já o asbesto, utilizado na área da construção civil sob a forma do cimento amianto, foi comprovado cientificamente ser causador de danos ao meio ambiente e também ser cancerígeno em pessoas expostas de forma regular. A maior parte das vezes a exposição ocorre no próprio posto de trabalho em que estas pessoas possuem contato direto com o material ou ainda através de contato ambiental substancial. No Brasil a legislação autoriza o uso do amianto com restrições e garantia de proteção à saúde do trabalhador. Atualmente está em discussão no STF (Supremo Tribunal Federal) a continuidade do uso do amianto no país.

Apesar de serem utilizadas como alternativa de reforço, as fibras naturais expostas aos ambientes alcalinos do cimento Portland comum podem ocasionar problemas para a durabilidade dos compósitos já que possuem uma tendência natural de degradação por microrganismos e fungos. Outro fator de degradação das fibras em um curto espaço de tempo é quando estas estão em presença de umidade. Assim sendo, o uso de fibras naturais deve ser cuidadosamente planejado.

2.7 Parâmetros que atuam em matrizes cimentícias reforçadas com fibras

Existem diversos parâmetros que atuam nas propriedades de matrizes cimentícia reforçadas com fibras. Entre os principais fatores podem ser citados os seguintes: teor, geometria, distribuição, orientação, resistência mecânica e módulo de elasticidade das fibras.

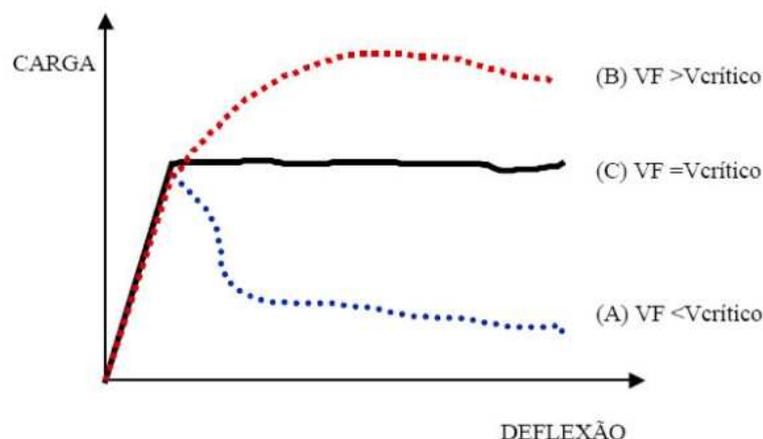
2.7.1 Teor de fibras

O número de fibras adicionado às matrizes cimentícias pode ser dado em volume ou em teor com base na quantidade dos materiais da própria matriz. Em geral, quanto maior o volume ou o teor, maior será o número de fibras que influem diretamente na fissura, trabalhando como ponte de transferência de tensões, controlando assim a propagação das fissuras e consequentemente atuando na tenacidade do compósito. Segundo Figueiredo (2000), existe um teor de fibra que, mesmo após o surgimento de fissuras, permite com que o compósito continue mantendo a sua capacidade portante, este é chamado de volume crítico de fibras.

A definição conceitual do volume crítico é a de que ele corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade portante para o compósito a partir da ruptura da matriz. Ou seja, abaixo do volume crítico, no momento em que haja a ruptura da matriz ocorre, necessariamente, uma queda na carga que o material tem capacidade de suportar. Acima do volume crítico, o compósito continua aceitando níveis de carregamentos crescentes mesmo após a ruptura da matriz (FIGUEIREDO, 2000).

Na Figura 12 podem-se observar as curvas de carga de compósitos com fibras rompidas à flexão. Existe um trecho elástico linear inicial que corresponde à fase pré-fissurada da matriz do compósito e outro, similar a um patamar de escoamento, onde se podem verificar as propriedades do compósito reforçado com teores abaixo, acima e igual ao volume crítico.

Figura 12: Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão (FIGUEIREDO, 2000).



Apesar de conhecer que maiores quantidades de fibras atuam como reforço de forma mais significativa em um compósito se comparadas com teores menores, esta afirmação merece um cuidado. Teores muito elevados podem diminuir significativamente a trabalhabilidade da matriz cimentícia e conseqüentemente as propriedades mecânicas do compósito no estado endurecido. Já teores muito baixos também causam uma diminuição na trabalhabilidade sem elevar significativamente as propriedades do material. Entretanto, segundo Figueiredo (2000), pela capacidade portante pós-fissuração que o compósito apresenta, as fibras permitem uma redistribuição de esforços no material ainda quando utilizada em baixos teores. Mesmo em teores menores pode-se dizer que quando as fibras são adicionadas em matrizes cimentícias, inevitavelmente atuam de forma a reduzir a trabalhabilidade no estado fresco. Além disso, a adição de fibras também impacta com um aumento no custo das misturas, devendo ser dosada de forma mais eficiente possível.

É bastante conhecido que a adição de qualquer tipo de fibra no concreto simples reduz a trabalhabilidade e, independente do tipo de fibra, esta perda de trabalhabilidade é proporcional à concentração volumétrica das fibras no concreto. Dessa forma, deve-se estudar muito bem a influência da relação do volume ou teor de fibras nas matrizes no estado fresco (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.7.2 Geometria das fibras

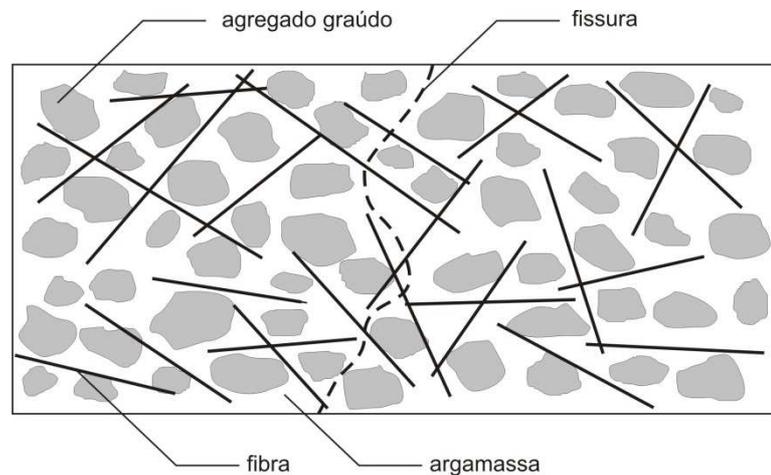
As fibras, além de possuírem diversas formas e seções, também podem apresentar variações de comprimentos. Assim sendo, a geometria das fibras é um parâmetro importante a ser

levado em consideração devido às suas variações. A razão entre o comprimento da fibra e seu diâmetro virtual é denominada fator de forma. Com essas características, é possível verificar a fibra mais apropriada para uma determinada matriz cimentícia. A geometria das fibras pode influenciar na aderência dos compósitos atuando na forma de ruptura dos mesmos, além de afetar de forma significativa a sua ductilidade. As fibras podem ser lisas ou rugosas (com ancoragem), dessa forma sua geometria deve ser estudada atentamente. A maneira de como a fibra irá se comportar no compósito e o seu possível arrancamento também será consequência direta das suas características geométricas.

Algumas diferenças na geometria das fibras são impostas durante o processo de fabricação. Essas diferenças são observadas nas fibras de aço, que assumem formas com seção transversal variável, aparência lisa ou ondulada e que podem ser retas, torcidas ou deformadas nas extremidades. Também nas fibras de polipropileno se observam variações geométricas. Elas podem ser retas, onduladas, fibriladas, com extremidades lisas ou em forma de botão (BERNARDI, 2003).

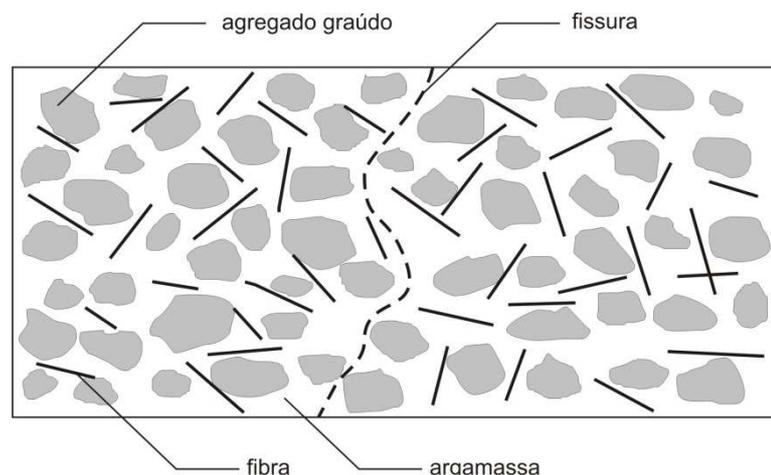
O dispositivo de ancoragem pode ser considerado como um dos principais mecanismos de transferências de tensões. Para Figueiredo (2000), a fibra que deve atuar como ponte de transferência de tensões nas fissuras deve ter um comprimento tal que facilite o seu correto posicionamento em relação à fissura. De acordo com Bernardi (2003), estudos realizados comprovam que as fibras com ancoragens em ganchos nas extremidades proporcionam aos compósitos maiores níveis de ductilidade à flexão. Na Figura 13 pode ser observado um exemplo de reforço com fibras em uma mistura de concreto onde existe uma compatibilidade dimensional.

Figura 13: Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre elas e o agregado graúdo (adaptado de FIGUEIREDO, 2000).



Já na Figura 14 está demonstrado um caso onde não há compatibilidade dimensional entre as fibras e os agregados graúdos do concreto. Neste exemplo, o comprimento da fibra não é o suficiente para fazer a ponte de transferência de tensões. Estas, além não servirem para o seu propósito de reforço, também acabam elevando o custo do compósito.

Figura 14: Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre elas e o agregado graúdo (adaptado de FIGUEIREDO, 2000).



2.7.3 Distribuição e orientação das fibras

Um dos fatores importantes no momento do acréscimo das fibras nas matrizes cimentícias no estado fresco é a sua distribuição. Uma distribuição não homogênea pode resultar na formação de “ninhos” na mistura e conseqüentemente uma minoração das qualidades propostas para o compósito no estado endurecido. Dessa forma, o comportamento do

compósito não depende apenas das características da matriz fibrosa, mas também da distribuição e orientação das fibras. Além do percentual de fibra existente em uma determinada seção transversal do compósito, a orientação das mesmas é determinante na resistência à flexão, à compressão, à tração e ao cisalhamento do mesmo. Assim sendo, durante a execução de matrizes cimentícias com reforços fibrosos, é de extrema importância tomar os devidos cuidados a fim de evitar o acúmulo das fibras, garantindo uma distribuição mais uniforme possível.

Os compósitos formados por fibras longas normalmente se apresentam com um grande grau de orientação, porque as fibras tendem a se alinhar na direção maior. Já os compósitos de fibras curtas apresentam fibras orientadas em diversas direções podendo, entretanto, estas apresentarem uma orientação predominante em função dos processos de mistura e adensamento (BERNARDI, 2003).

Compósitos com fibras apresentam alto caráter anisotrópico, ou seja, as propriedades mecânicas e reológicas são influenciadas fortemente pelo sentido de orientação das fibras. Os compósitos de fibras longas apresentam máximo efeito de orientação, pois a maioria das fibras encontram-se alinhadas na mesma direção. Já os compósitos de fibras curtas podem apresentar orientação preferencial das fibras em uma dada direção, geralmente em decorrência das características do processamento (FÉLIX, 2002).

2.7.4 Resistência mecânica e módulo de elasticidade das fibras

Em geral, as fibras utilizadas como reforços em compósitos podem ser divididas em dois grupos. As que têm propriedades com módulo de elasticidade menor que o da matriz cimentícia e as com módulo maior. O módulo, juntamente com as dimensões das fibras e sua respectiva resistência à tração, é essencial para definir sua contribuição de reforço ao compósito. De acordo com Bernardi (2003), fibras com alto módulo de elasticidade e resistência à tração (asbesto, vidro, aço, carbono, aramida, entre outros) tendem a proporcionar um acréscimo de resistência à matriz, já os compósitos produzidos com fibras de módulo de elasticidade mais baixo que o da matriz cimentícia (celulose, nylon, polipropileno, entre outros) tendem a aumentar a sua resistência ao impacto pelo fato das fibras resistirem a grandes deformações.

Quando o módulo de elasticidade da matriz é maior que o das fibras, estas tendem a apresentar uma limitada capacidade de reforço. Isto se deve ao fato dos cimentos em conjunto

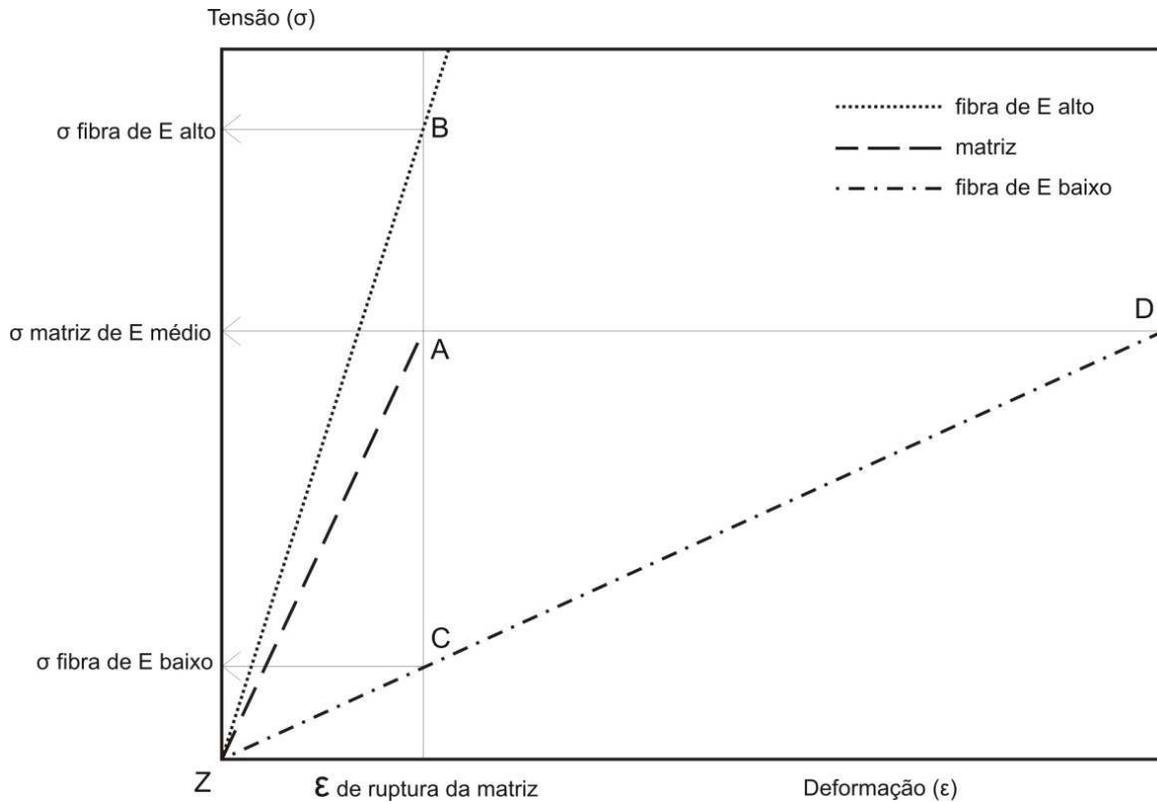
com os aditivos aceleradores de pega e redutores de água, propiciarem um elevado ganho de resistência inicial e, em paralelo, do módulo de elasticidade. Dessa forma, as fibras de baixo módulo só têm possibilidade de atuar como reforço num curto espaço de tempo após o lançamento, onde a cura bem feita já garante os bons resultados (FIGUEIREDO, 2000).

Os compósitos produzidos com fibras de baixo módulo de elasticidade geralmente não são utilizados para suportar cargas permanentes elevadas, pois com a presença de microfissuras na matriz estas fibras tendem a sofrer alongamentos ou deflexões consideráveis ao longo do tempo. Por isso é mais comum que tais fibras sejam utilizadas em situações onde não se espera que a fissuração da matriz ocorra, mas que há presença de sobrecargas transitórias, tais como sob tensões de manipulação da peça, impactos ou cargas de vento. Outro problema correlacionado a estas fibras consiste nos seus valores elevados do coeficiente de Poisson, que combinado com os baixos módulos de elasticidade, implica em contrações muito maiores do que as verificadas com o uso de outras fibras quando são solicitadas ao longo do seu eixo. Isso acaba por levar a altas tensões de tração laterais na interface fibra-matriz, o que acaba provocando um descolamento prévio da fibra e arrancamento da mesma (HANNANT, 1978 *apud* LAMEIRAS, 2007).

Na Figura 15 é representado o trabalho de uma matriz hipotética reforçada com dois tipos de fibras, uma de módulo de elasticidade alto e outra de módulo baixo. A curva de tensão por deformação da matriz está representada pelo segmento de reta Z-A, e os segmentos Z-B e Z-C estão representando, respectivamente, o comportamento elástico das fibras de alto e baixo módulo.

³ HANNANT, D. J. Fiber cements and fiber concretes. Guildford. John Wiley & Sons. United Kingdom. 1978.

Figura 15: diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto (FIGUEIREDO, 2000).



No gráfico da Figura 15 observa-se que no momento que a matriz se rompe (ponto A) e transfere a tensão para a fibra de baixo módulo (ponto C), esta mesma fibra apresenta uma tensão muito baixa neste nível de deformação, devendo ser deformada mais intensamente (até o ponto D) para garantir o mesmo nível de tensão médio da matriz. Dessa forma a fibra de baixo módulo não poderá oferecer uma capacidade de reforço após a fissuração da matriz para um dado carregamento ou irá permitir uma grande deformação do compósito com um elevado nível de fissuração (ponto D) conseqüentemente. De acordo com Figueiredo (2000), em geral fibras de baixo módulo apresentam menor resistência mecânica e, fibras com alto módulo de elasticidade tendem a apresentar um elevado nível de tensão no momento de ruptura da matriz, como se pode observar na Tabela 3, o que lhe permitirá agir como um reforço caso sua resistência não seja superada.

Tabela 3: Caracterização dos diferentes tipos de fibras utilizadas como reforço em matrizes cimentícias (BENTUR E MINDESS, 1990).

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5 - 500	7,84	190-210	0,5 - 2,0	0,5 - 3,5
Vidro	9 - 15	2,60	70 - 80	2 - 4	2 - 3,5
Amianto	0,02 – 0,4	2,6	160 – 200	3 – 3,5	2 - 3
Polipropileno	20 – 200	0,9	1 – 7,7	0,5 – 0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65 – 133	3,6	2,1 – 4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Náilon	-	1,1	4,0	0,9	13 - 15
Celulose	-	1,2	10	0,3 – 0,5	-
Acrílico	18	1,18	14 – 19,5	0,4 – 1,0	3
Polietileno	-	0,95	0,3	0,7 x 10 ⁻³	10
Fibra de madeira	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10 – 50	1 – 50	-	0,8	3,0
Matriz de cimento (para comparação)	-	2,50	10 – 45	3,7	0,02

2.8 Zona de transição fibra-matriz

O comportamento mecânico de um compósito com base cimentícia e reforçado com fibras está diretamente ligado com as propriedades da zona de transição fibra-matriz. Segundo Savastano (1992), a zona de transição entre a fibra e a matriz compreende a região da pasta de cimento próximo à fibra, com espessura entre 10 e 100 µm, que apresenta propriedades diferenciadas da matriz.

Em teoria, quando se adicionam fibras em uma matriz pretende-se que estas atuem positivamente nas transmissões de tensões, absorvendo-as nas suas interfaces e consequentemente melhorando as propriedades mecânicas do material. Estas ligações de interfaces podem ser tanto físicas como químicas ou ambas. Ligações muito fracas de interface resultam em um material com menor resistência, mas com maior deformação antes

do rompimento. Já as ligações mais fortes geram um compósito com maior resistência, entretanto mais frágil com rompimento brusco.

A zona de transição da interface fibra-matriz pode ser considerada como o ponto de maior fragilidade no material devido à formação de bolhas de ar e/ou água que posteriormente, com a hidratação do Ca(OH) e cura do material, também irão aumentar a porosidade do compósito. Dessa forma, pode-se considerar que a zona de transição fibra-matriz possui intrinsicamente propriedades diferentes do restante da matriz, afetando diretamente o desempenho mecânico do compósito.

O comportamento de uma matriz de concreto ou argamassa reforçada com fibras está intimamente ligado à interação fibra-matriz. Dessa maneira, o conceito básico do reforço com fibras é o da transferência das tensões da matriz para as fibras, tanto na fase pré-fissuração como após a ocorrência da primeira fissura. A capacidade de reforço da fibra depende do grau de transferências dessas tensões, que é regido pelas próprias características das fibras, descritas a seguir (GOMES, 2005):

- resistência à tração e alongamento;
- módulo de deformação: pois quanto maior o módulo de deformação da fibra, maior será o esforço que essa suportará (desde que seja mantida a aderência);
- resistência ao cisalhamento; que depende da adesão, fricção e entrelaçamento mecânico na interface;
- relação de Poisson; pois as diferenças entre estas relações (da matriz e da fibra) geram esforços perpendiculares à fibra;
- fluência; pois pode ocorrer com o tempo um relaxamento na fibra;
- relação de aspecto comprimento/diâmetro (L/d); pois quando a fibra é mais curta que um comprimento crítico (L_c) esta é arrancada por falha de aderência. Em caso contrário, a fibra rompe por tração (desde que mantenha a aderência na interface);
- forma e textura; pois a aderência fibra-matriz é afetada diretamente pelas diversas formas e texturas existentes nos elementos fibrosos;

- comprimento absoluto; que se recomenda ser maior que três vezes a dimensão máxima do agregado utilizado no compósito;

- estrutura das fibras; pois essas podem ser mono ou multifibrilares e podem colaborar ou não com sua aderência à matriz.

A eficiência das fibras com relação à melhoria das propriedades mecânicas da frágil matriz cimentícia é controlada pelos processos pelos quais o carregamento é transferido da matriz para as fibras e pelo efeito das fibras costurarem as fissuras que se abrem na matriz, o que ocorre em um estágio mais avançado de carregamento. A compreensão destes mecanismos permite que sejam previstos os modos de fratura do compósito (frágil ou dúctil) e servem também como base para o desenvolvimento de compósitos com desempenhos melhorados através da modificação da interação entre as fases constituintes (LAMEIRAS, 2007).

3 A FIBRA ÓPTICA POLIMÉRICA (FOP)

As fibras ópticas poliméricas são de uma maneira geral pouco conhecidas, tanto no campo científico como no meio menos técnico. Normalmente, as únicas fibras lembradas são as feitas de vidro. Como as fibras de vidro têm algumas vantagens, estas têm dominado o mercado, enquanto as FOP (fibras ópticas poliméricas) mantiveram-se em grande parte em segundo plano. Recentes desenvolvimentos em novas tecnologias e aplicações, entretanto, têm dado maior prestígio à imagem das FOP, e estas estão encontrando um mercado maior com empresas de tecnologia em todo o mundo. Hoje, um novo entusiasmo permeia o lado das fibras ópticas poliméricas (POLISHUK, 2006).

Fibras ópticas poliméricas (FOP) são muito úteis para aplicações de curta distância tais como: redes locais, eletrônica de veículos, automação industrial, sensores (na Medicina e indústria), iluminação, sinais, entre outros. Embora apresentem maior atenuação do sinal transmitido, elas oferecem grandes benefícios técnico-econômicos se comparadas às fibras ópticas de vidro, devido à flexibilidade, tenacidade, maiores diâmetros, maior abertura numérica, fácil manuseio e baixo custo (BARTOLI et al., 1999).

As fibras ópticas poliméricas servem como um complemento das fibras de vidro em ligações de curta distância, pois são mais fáceis de manusear, mais flexíveis e econômicas. Por causa desses méritos, foram desenvolvidas aplicações variadas com as FOP, sendo comercializadas desde para um uso simples de transmissão de luz, até para sensores, cabos de telecomunicações, entre outros (ZUBIA; ARRUE, 2001).

Uma fibra óptica pode ser considerada como um condutor óptico em forma de fio com pouca espessura por onde a luz pode ser conduzida no seu interior. A FOP na sua forma mais básica consiste em um núcleo e uma camada de revestimento protetor, ambos cilíndricos e concêntricos. Além das fibras ópticas poliméricas (FOP) também existem as fibras ópticas de vidro (FOV) que apresentam características diferentes, mas podem ser destinadas para um mesmo uso. Neste capítulo serão apresentadas, principalmente, as características das fibra ópticas poliméricas e também serão apontadas algumas comparações com as fibras ópticas de vidro e cabos de cobre.

3.1 Histórico de desenvolvimento

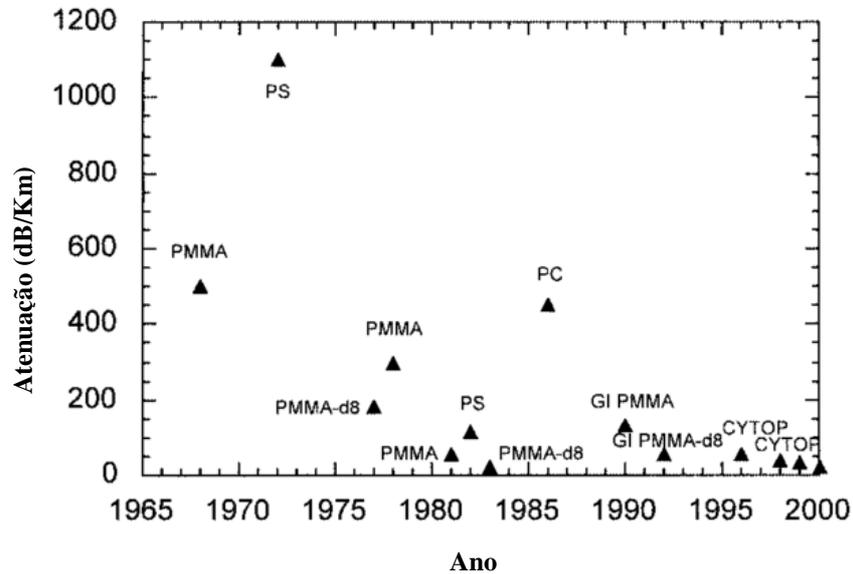
Desde a invenção do telégrafo por Samuel Morse em 1838, uma crescente porção de espectros magnéticos tem sido utilizada para o transporte de informações de um lugar para outro. Segundo Zubia e Arrue (2001), as fibras ópticas poliméricas de núcleo com tecnologia PMMA (polimetilmetacrilato), foram introduzidas na década de 1960, embora as primeiras fibras ópticas, que foram usadas como canais de comunicações, eram feitas de vidro. Nas últimas décadas, junto com as sucessivas melhorias nas fibras de vidro, as FOP's também se tornaram cada vez mais populares devido à sua crescente utilidade.

A fibra óptica polimérica (FOP), usando a tecnologia polimetilmetacrilato (PMMA), teve sua origem no início dos anos 60, sendo desenvolvida inicialmente pela empresa Pilot Chemical of Boston (EUA), e mais tarde por pesquisadores da empresa Du Pont, no final dos anos 60. Após muitos anos de desenvolvimento, a empresa Du Pont decidiu, em 1978, vender a patente de pesquisa das FOP para a Mitsubishi Rayon do Japão. Na época, as perdas de transmissão nas fibras eram de 1000 dB/km quando a Du Pont vendeu o negócio. A Mitsubishi Rayon, nos anos posteriores, conseguiu diminuir estas perdas nas fibras PMMA para aproximadamente 150 dB/km.

Nesta linha de melhoramentos sucessivos, o grande avanço a ser destacado foi feito pelo Prof. Koike e seus colegas da Universidade de Keio no Japão, que desenvolveram um processo para fabricação classificada índice GI-POF, usando material PMMA em 1990, mas as perdas ainda continuavam em torno de 150 dB/km. Posteriormente, foi desenvolvido também por Koike e seus colegas, em 1995, a fibra de polímero fluoretado amorfo (CYTOP), com perdas de menos de 50dB/km.

Diversos avanços em outras pesquisas no mundo foram feitos a partir do trabalho executado na Universidade de Keio. Na Figura 16 observa-se a evolução da tecnologia utilizada nos núcleos das FOP da década de 1960 até o ano de 2000. Quanto maior a atenuação (dB/km), maior é a perda de transmissão ao longo do caminho.

Figura 16: Evolução histórica da atenuação das FOP, da década de 1960 até o ano de 2000, em função do material constituinte do núcleo (ZUBIA e ARRUE, 2001).



O sucesso das FOP, hoje ao redor do mundo, deve-se principalmente à sua facilidade de uso e pelo fato de que as técnicas de produção avançaram bastante desde a década de 60. Por ainda não serem fabricadas no Brasil, as fibras ópticas importadas apresentam um custo elevado. Entretanto, como as FOP's possuem diversas finalidades de uso, para curtas distâncias apresentam melhor custo-benefício em relação às fibras ópticas de vidro.

3.2 Comparação, com vantagens e desvantagens, das FOP's em relação aos outros tipos de fibras

Na indústria da transmissão de dados, as fibras ópticas plásticas competem com as fibras ópticas de vidro e cabos de cobre por um maior espaço no mercado. As fibras ópticas poliméricas são uma promissora tecnologia para transmissões de curto alcance. Segundo Monroy *et. al.* (2003), se comparadas com cabos de cobre e fibras de vidro, as FOP's são superiores nos aspectos de simplicidade, largura de banda de transmissão, flexibilidade, facilidade de manuseio e instalação, resultando em menores custos.

Fabricantes de fibras ópticas poliméricas utilizam como matérias-primas os seguintes componentes, por exemplo: poliestireno (PS), policarbonato (PC), polimetilmetacrilato (PMMA), polímero fluoretado (CYTOP), entre outros. Entretanto, a perda de luz transmitida ainda é alta, desde 150dB/km para materiais PMMA até 1000 dB/km para poliestirenos e policarbonatos. Estas perdas são frequentemente decorrentes da deficiência das fibras ópticas plásticas em competir com as fibras de vidro de alta qualidade.

Devido às suas características de perda de transmissão, as fibras ópticas plásticas vêm sendo utilizadas para curtas distâncias, tipicamente de algumas centenas de metros ou menos. Para ter uma ideia de comparação, as fibras ópticas de vidro são largamente utilizadas para distâncias de centenas de quilômetros. Ainda assim, as FOP's podem ser destinadas para muitas aplicações, dividindo-se basicamente em: transmissão de dados de comunicação e de não dados (sensores, sinais luminosos, entre outros). Hoje, o aumento na produção de FOP decorre de sua utilização para a transmissão de dados de curtas distâncias.

As fibras ópticas poliméricas, em relação aos componentes feitos de vidro ou cobre, apresentam as seguintes vantagens:

- apresentam custo mais baixo;
- são mais leves;
- possuem maior flexibilidade e elasticidade à flexão, choque e vibração;
- têm imunidade à interferência eletromagnética;
- são de fácil manipulação, entre outros.

Entretanto, as fibras ópticas plásticas também possuem algumas desvantagens, por exemplo:

- maiores perdas durante a transmissão;
- reduzido número de fabricantes;
- falta de conhecimento das suas propriedades mesmo entre técnicos do ramo;
- potencial de utilização ainda pouco explorado;
- pouca resistência para temperaturas muito elevadas, entre outros.

Na Tabela 4 observa-se a comparação entre os diferentes meios de transmissão: fibra óptica plástica, fibra óptica de vidro e fios de cobre.

Tabela 4: Comparação entre fibra óptica polimérica, fibra óptica de vidro e fio de cobre (POLISHUK, 2006).

	Fibra Óptica Polimérica	Fibra de Vidro	Fio de Cobre
Custos dos componentes	Potencialmente baixo	Mais caro	Baixo
Perdas	Alta-média (para curtas distâncias)	Média-baixa (para longas distâncias)	Alta
Conexões	Fácil para conectar, requiere pequeno treinamento ou ferramentas especiais	Demandam mais tempo, requerem ferramentas especiais e treinamento	Altas
Manipulação	Fácil	Requer treinamento e cuidado	Fácil
Flexibilidade	Flexível	Frágil	Flexível
Faixa de operação de comprimento de onda	Visível	Infravermelho	NA (não se aplica)
Abertura numérica	Alta (0,4)	Baixa (0,1 – 0,2)	NA (não se aplica)
Largura de banda	Alta (11Gbps acima de 100 metros)	Larga (40 Gbps)	Limitada a 100 metros para 100 Mbps
Equipamento de teste	Custo baixo	Caro	Alto
Custo do sistema	Baixo	Alto	Médio

3.3 Perdas de transmissão

Todas as fibras possuem perdas que podem ser intrínsecas ao material e/ou distribuídas ao longo do seu comprimento. No caso das FOP estas perdas, tanto de transmissão de dados quanto de luminosidade, tornam-se significativas em grandes distâncias. Segundo Zubia e Arrue (2001), as FOP servem como um complemento para as fibras de vidro nas

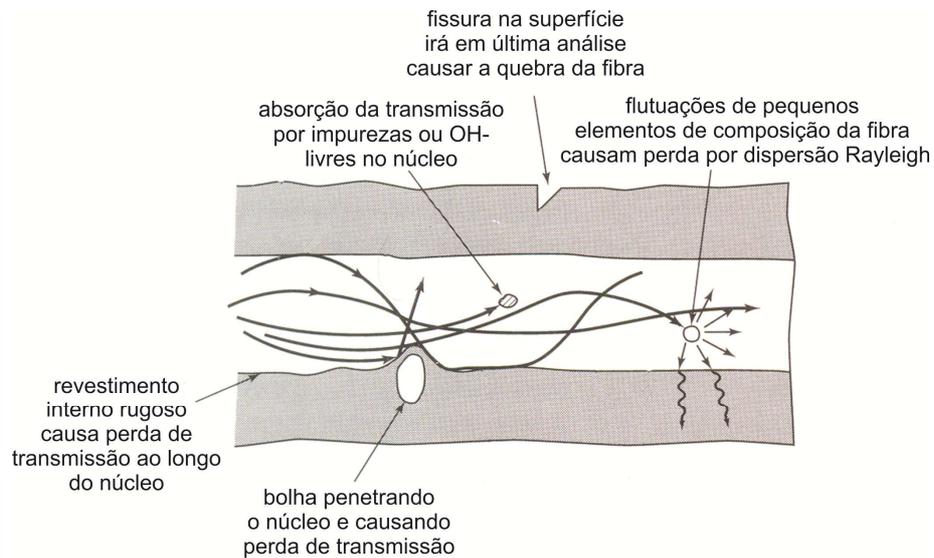
comunicações de curta distância, pois são fáceis de manusear, flexíveis e econômicas, embora não sejam recomendadas para maiores distâncias (acima de 1 km de extensão) devido à sua atenuação de transmissão relativamente alta. De acordo com Monroy *et. al.* (2003), as áreas de aplicação que podem se beneficiar do uso das fibras ópticas poliméricas para a transmissão de luz/dados incluem aquelas de curtas distâncias, tipicamente alcançando de 100 a 1000 metros de extensão. Como o presente trabalho estuda a influência dessas fibras para o emprego na construção civil em uma parede com, por exemplo, 25 cm de espessura, estas perdas podem ser consideradas como insignificantes, entretanto merecem esta curta abordagem.

Partes das perdas nas FOP são devidas aos fenômenos intrínsecos: absorção no infravermelho e espalhamento Rayleigh e alguns são extrínsecos: contaminantes e processos de fabricação. As perdas devido à fabricação são ocasionadas por imperfeições na estrutura do guia de onda, tais como: diferenças no tamanho do diâmetro, irregularidades na interface núcleo-revestimento e formação de dupla-refração (BARTOLI *et al.*, 1999).

Os principais atributos de qualquer tipo de transmissão são as características dos comprimentos de ondas e as suas respectivas velocidades. A perda de força no sinal em uma fibra óptica pode resultar da absorção ou dispersão da luz ao longo da sua trajetória. A absorção é causada principalmente pelas impurezas nas fibras, tais como metais e moléculas de água. Já a dispersão da luz pode ser causada pelas impurezas do material, defeitos nas fibras (vazios, por exemplo), nas interfaces núcleo-revestimento e nas superfícies de topo da fibra (POLISHUK, 2006).

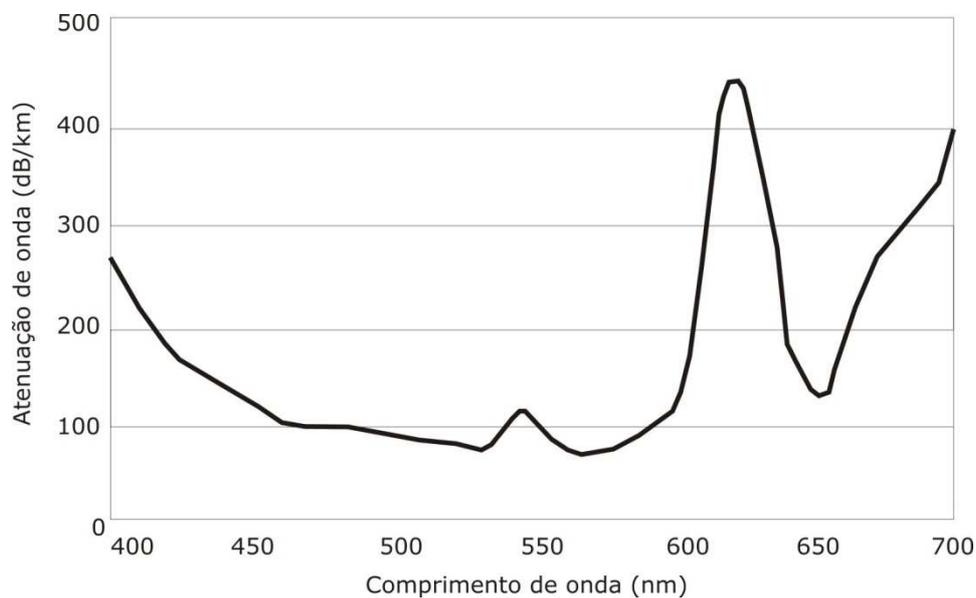
Em geral, pode-se considerar que existem três mecanismos básicos de perda: absorção, dispersão e manipulação. A perda de absorção é devida a interação da luz com os modos de vibração molecular, sendo que a resultante perda de energia é convertida em calor. No processo de espalhamento (dispersão Rayleigh), flutuações de pequenos elementos de composição da fibra, remanescentes do processo de produção, podem converter a potência óptica guiada no núcleo em modos não guiados de ondas tanto no sentido do fluxo, como na direção contrária. Ainda existem as perdas causadas por danos durante os diversos processos de manuseio da fibra, causando fissuras na sua superfície. Na Figura 17 podem-se observar os vários mecanismos causadores de perdas nas fibras.

Figura 17: diversos mecanismos que podem causar perdas de transmissão nas fibras
(adaptado de CHEN, 1996).



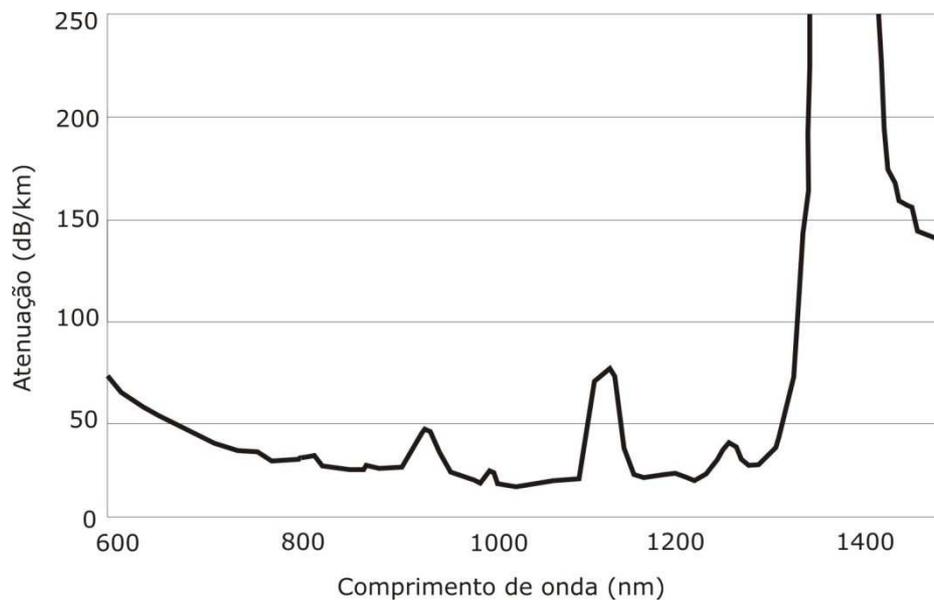
É notável a evolução das fibras ópticas plásticas, em termos de perdas menores, da tecnologia PMMA (desenvolvida em meados da década de 60) para a CYTOP (desenvolvida em meados da década de 90). A Figura 18 demonstra uma típica curva de perda para fibras PMMA. Segundo Polishuk (2006), este tipo de fibra para transmissão de luz não deve passar de 100 metros de comprimento.

Figura 18: espectro de perdas para fibras de polimetilmetacrilato - PMMA (POLISHUK, 2006)



Já as novas tecnologias de fibras plásticas de polímeros fluoretados (CYTOP) exibem uma melhor transmissão de luz para um horizonte mais amplo de comprimentos de ondas. A Figura 19 mostra um típico espectro de perda de transmissão para a fibra CYTOP. Segundo Polishuk (2006), a redução de perdas das fibras poliméricas CYTOP permite que estas possam ser utilizadas para transmissão de luz em extensões de alguns poucos quilômetros.

Figura 19: espectro de perdas para fibras de polímeros fluoretados - CYTOP (POLISHUK, 2006)



De acordo com Zubia e Arrue (2001), embora existam fenômenos extrínsecos de perdas por absorção causadas por impurezas no núcleo das FOP fundamentalmente originadas pela presença da transição de íons metálicos (níquel, cobalto, cromo, manganês, aço), as perdas mais significativas são aquelas que surgem por dispersão devido às imperfeições estruturais nas fibras geradas ainda durante o seu processo de fabricação. Na Tabela 5 observam-se alguns tipos de materiais constituintes do núcleo das fibras e suas respectivas perdas de acordo com os fatores atenuantes. No cálculo da atenuação teórica são descartadas as perdas ocasionadas pelas imperfeições estruturais das fibras.

Tabela 5: Fatores de perdas e limites de atenuação teórica para as FOP's com diferentes núcleos (adaptado de ZUBIA e ARRUE, 2001).

Fator de perda (dB/km)	PMMA (568nm)	PS (672nm)	CYTOP (1300nm)
Absorção	17	26	10
Dispersão Rayleigh	18	43	2
Imperfeições estruturais	20	45	4
TOTAL DE PERDAS	55	114	16
Atenuação teórica*	35	69	12

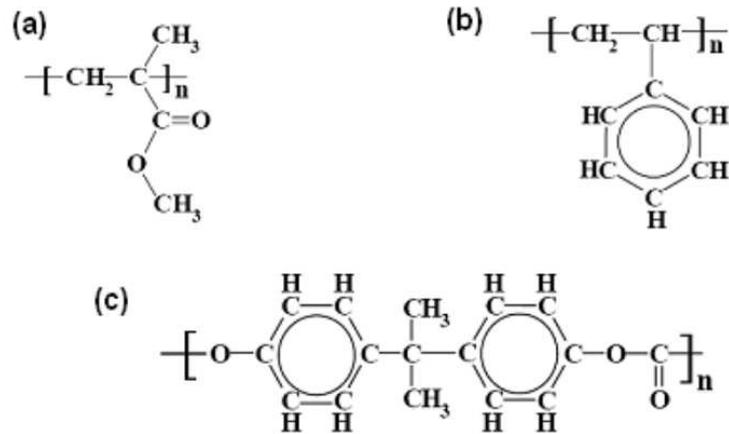
* atenuação considerando fibra com estrutura teoricamente perfeita

3.4 Composição e estrutura química dos polímeros

Polímeros ou macromoléculas são compostos orgânicos construídos por encadeamento de um grande número de moléculas muito menores. As pequenas moléculas que se combinam para formar as moléculas poliméricas são chamadas de monômeros e as reações pelas quais elas se combinam são chamadas de polimerizações. Podem existir centenas, milhares ou centenas de milhares de moléculas monômeros ligadas entre si e agrupadas em uma única molécula polimérica. Quando se fala de polímeros, pode-se pensar em materiais cujos pesos moleculares podem chegar a centenas de milhares ou milhões (ODIAN, 2004).

Em geral, os materiais que constituem o núcleo das fibras ópticas poliméricas podem ser formados por cadeias moleculares de: polimetilmetacrilato (PMMA), policarbonato (PC), poliestireno (PS), polímeros fluoretados amorfos (CYTOP), entre outros. Na Figura 20 observa-se a estrutura molecular de alguns destes materiais.

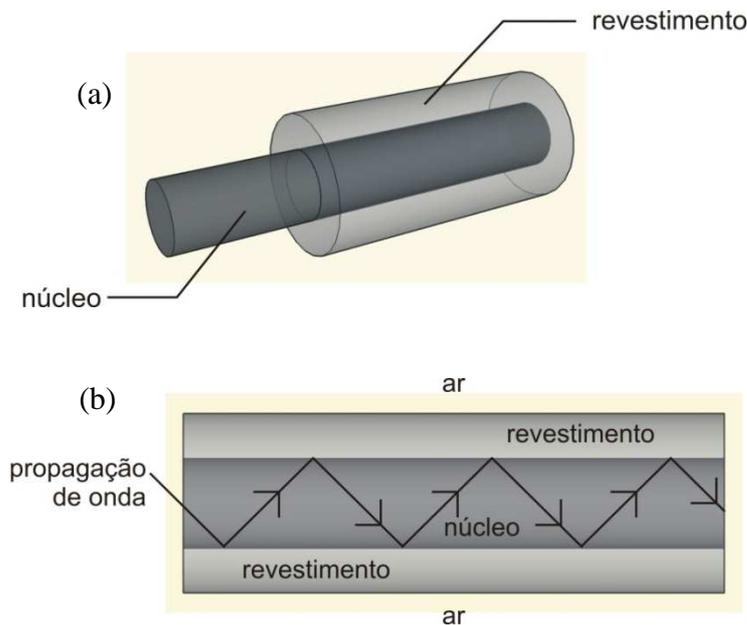
Figura 20: estrutura molecular do monômero: (a) polimetilmetacrilato - PMMA; (b) poliestireno - PS; (c) policarbonato – PC (URIBE, 2010)



3.5 Composição estrutural das fibras ópticas

A fibra óptica pode ser descrita como um cilindro extremamente fino, como um fio, que permite a propagação de luz através do seu interior. Nas estruturas mais simplificadas das FOP, estas são compostas por um núcleo e um revestimento, ambos cilíndricos. O núcleo é composto por um polímero de elevada pureza e qualidade, permitindo um alto índice de refração, sendo que sua principal função é a transmissão de luz e/ou dados com o menor índice de perdas possível. Já o revestimento possui a função de envolver e proteger o núcleo, podendo ser composto por polímeros de qualidade levemente inferior ao núcleo. Segundo Uribe (2010), além de proteger o núcleo, o revestimento também tem a função de confinar a luz, evitando que se refrate e garantindo assim sua propagação ao longo do seu comprimento. Na Figura 21 está ilustrada a estrutura geométrica de uma FOP e como acontece a transmissão de onda no seu interior.

Figura 21: estrutura e funcionamento da FOP: (a) composição; (b) propagação de onda através do núcleo.



A transmissão de luz ao longo da fibra acontece quando a onda percorre o núcleo e nele ocorrem sucessivas reflexões na superfície interna de interface núcleo-revestimento resultando no fenômeno que chega muito próximo à reflexão total interna. Geralmente o núcleo, por ser composto de um polímero de qualidade mais pura e nobre, possui um índice de refração maior que o revestimento. Conseqüentemente, quando a luz encontra uma superfície de interface com um índice de refração menor ela reflete em grande parte. De acordo com Uribe (2010), quanto maior for a diferença entre os índices maior é o ângulo de incidência, então se fala de reflexão total interna, sendo esta a condição mais importante para que a fibra óptica possa confinar a luz no núcleo e guiar o feixe.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o programa experimental adotado para a avaliação da influência da adição de fibras ópticas poliméricas em blocos de argamassa em relação ao seu comportamento estético, mecânico e de absorção. Este é constituído por ensaios de caracterização dos materiais empregados, de desempenho mecânico e absorção de água do compósito de acordo com o teor de fibra adotado e requisitos de translucidez ao qual o material é proposto.

Esta dissertação busca utilizar técnicas e ensaios já consolidados por normas e também, algumas vezes, adaptados de forma a permitirem a avaliação da interferência de diferentes métodos de execução e teores de FOP inseridos em blocos de argamassas.

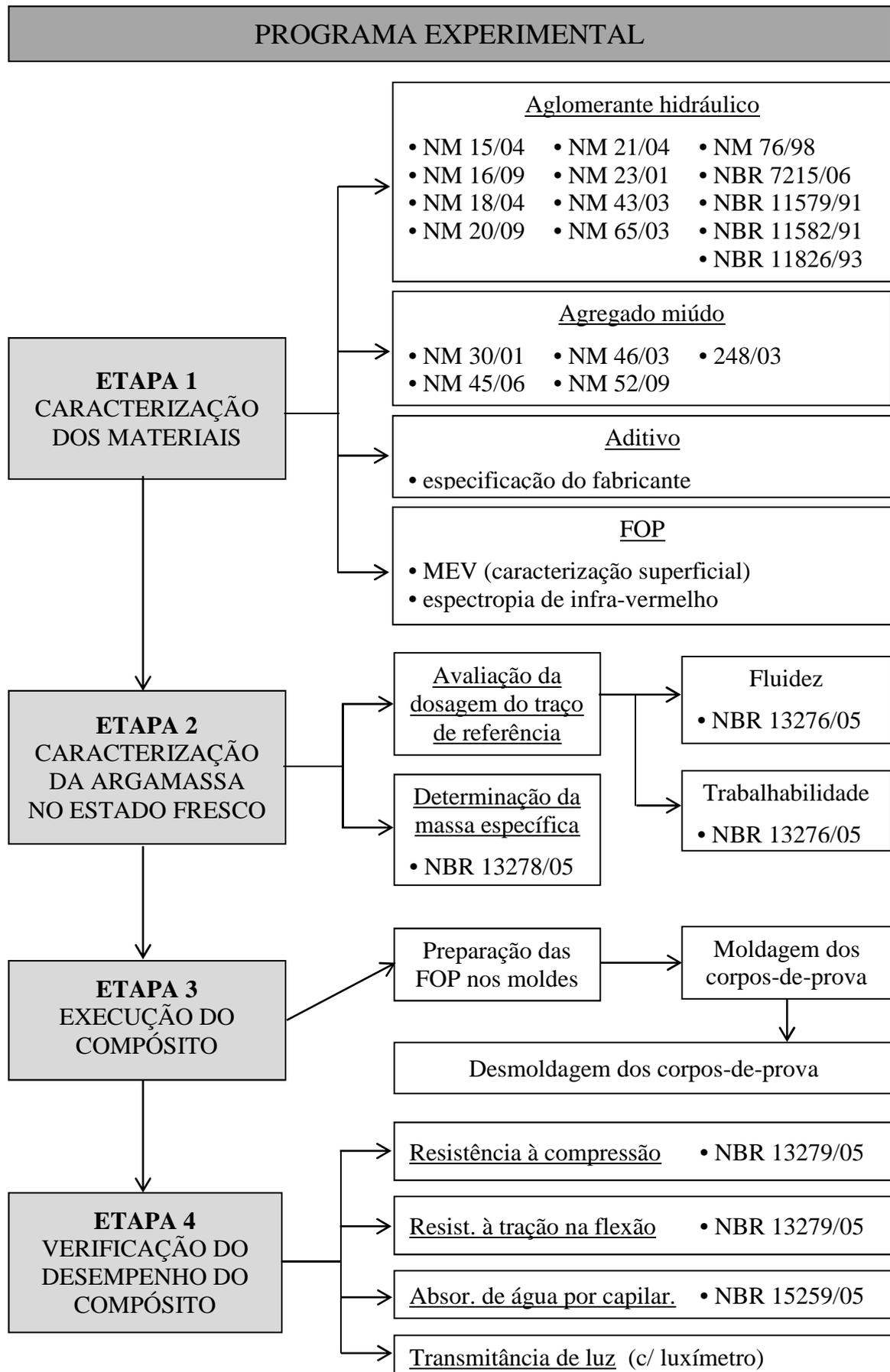
É dosada uma família referência com argamassa sem adição de FOP para utilizar como comparativo com outras três que possuem diferentes teores de FOP na mistura. Para cada uma das famílias serão comparadas algumas propriedades das argamassas, quais sejam: resistência à compressão, à tração na flexão, absorção de água por capilaridade e transmitância de luz.

A Figura 22 representa esquematicamente o projeto experimental, dividido nas seguintes etapas:

- etapa 1 (caracterização dos materiais): é uma importante etapa pois serve, além da caracterização propriamente dita, para verificar se os materiais estão em condições técnicas satisfatórias para o uso nos ensaios;
- etapa 2 (caracterização da argamassa no estado fresco): etapa onde será desenvolvido um traço de referência para a argamassa a fim de obter uma adequada dosagem para os requisitos de trabalhabilidade e fluidez para posterior adição de FOP;
- etapa 3 (execução do compósito): é nesta a etapa que serão desenvolvidos os procedimentos de preparação, mistura, moldagem e desmoldagem dos blocos de argamassa translúcida, com e sem adição de FOP;

- etapa 4 (verificação do desempenho do compósito): etapa que os blocos de argamassa de referência e translúcida serão submetidos aos ensaios de resistência à compressão, à tração na flexão e absorção de água por capilaridade aos 28 dias. Serão realizados também testes de transmitância de luz, a fim de avaliar a qualidade estética de translucidez do material.

Figura 22: Fluxograma do programa experimental



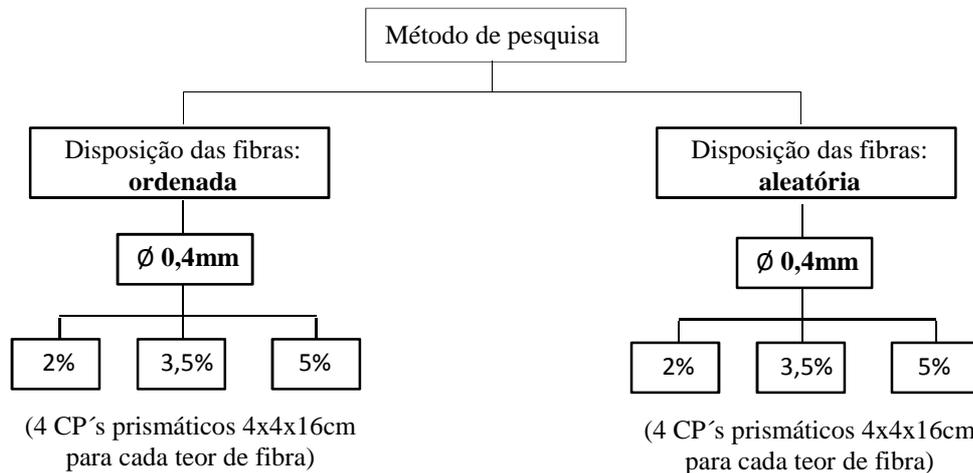
4.1 Metodologia de pesquisa

Para atingir os objetivos de verificação do desempenho do compósito, serão analisadas as seguintes variáveis:

- a) três teores de FOP (2%; 3,5%; 5%);
- b) dois métodos de execução de placas translúcidas: ordenado e aleatório.

Como parâmetro fixo em todos os corpos de prova, o traço da argamassa (desconsiderando a adição das fibras ópticas) foi o fator que se manteve fixo. Para melhor visualização do método de pesquisa foi elaborado um diagrama (Figura 23).

Figura 23: diagrama de método de pesquisa



A metodologia de pesquisa do programa experimental visa, portanto, elaborar diretrizes para obtenção e análise de concreto translúcido com base em materiais, técnicas e ensaios nacionais, a fim de se obter um produto que corresponda principalmente ao seu propósito de resistência mecânica e translucidez.

4.2 Materiais empregados no estudo

Os materiais utilizados nesta dissertação foram submetidos a vários ensaios com o objetivo de obter-se, quando possível, a caracterização física, química e mecânica. Assim sendo, se buscou obter uma avaliação da qualidade e das condições técnicas destes materiais para o uso comparativo nos resultados.

4.2.1 Cimento

A fim de utilizar um cimento sem qualquer tipo de adição, mas apenas calcário moído, o escolhido foi o tipo CP V. Segundo Recena (2011), um CP V, devido ao seu processo de fabricação, supostamente tende a apresentar maior homogeneidade em suas características já que cimentos fabricados com adições ativas têm o seu comportamento influenciado pelas características da adição e pela percentagem de substituição. A caracterização física, química e mecânica do cimento encontram-se nas Tabela 6,

Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 6: Caracterização* física do cimento CP V

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências (normas ABNT)
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm ² /g	4 401	≥ 3 000
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm ³	3,11	não aplicável
Resíduo na peneira #200	ABNT NBR 11579/91	%	0,10	≤ 6,0
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 11826/93	%	1,02	não aplicável
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	30,2	não aplicável
Início de pega	ABNT NM 65/03	minutos	140	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	minutos	187	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/91	mm	0,00	≤ 5,0

*caracterização fornecida pelo fabricante.

Tabela 7: Caracterização* química do cimento CP V

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências (normas ABNT)
Resíduo Insolúvel – RI	ABNT NM 15/04	%	0,4	≤ 1,0
Perda ao Fogo – PF	ABNT NM 18/04	%	2,6	≤ 4,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NM 21/04	%	1,5	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre – SO ₃	ABNT NM 16/09	%	3,0	≤ 4,5

Anidrido Carbônico – CO ₂	ABNT NM 20/09	%	1,0	≤ 3,0
--------------------------------------	---------------	---	-----	-------

*caracterização fornecida pelo fabricante.

Tabela 8: Caracterização* mecânica do cimento CP V

Ensaio – NBR 7215 (ABNT, 1996)	Unidade	Desvio Padrão	Resultado	Exigências (normas ABNT)
Resistência à Compressão – 1 Dia	MPa	1,09	27,6	≥ 14,0
Resistência à Compressão – 3 Dias	MPa	1,60	40,4	≥ 24,0
Resistência à Compressão – 7 Dias	MPa	1,54	46,0	≥ 34,0
Resistência à Compressão – 28 Dias	MPa	1,61	55,3	não aplicável

*caracterização fornecida pelo fabricante.

4.2.2 Agregado miúdo

No preparo, antes da utilização, o agregado miúdo foi seco através de exposição ao sol. A areia possui origem quartzosa, sendo obtida por dragagem direta do leito do rio Jacuí, no Rio Grande do Sul.

O agregado miúdo utilizado na confecção das argamassas foi peneirado e pode ser chamado comercialmente como areia fina. Devido ao rígido controle proposto de paralelismo e integridade das FOP's, é provável que uma areia de granulação média não permitisse um bom espalhamento e preenchimento dos espaços entre as fibras. A composição granulométrica do agregado miúdo encontra-se na Tabela 9, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Tabela 9: Caracterização física do agregado miúdo.

Peneira (abertura)	Massa retida (g)	% em massa	
		Retida	Acumulada
4,75 mm	0	0	0
2,36 mm	0	0	0
1,18 mm	0	0	0
0,6 mm	6,5	2	2
0,3 mm	205,2	68	70
0,15 mm	74,6	25	95
< 0,15 mm	13,7	5	100
Total	300	100	167
Módulo de finura			1,67
Dimensão máxima característica (mm)			0,6
Massa unitária (NBR NM 45/06)			1,44 (g/cm ³)
Massa específica (NBR NM 52/02)			2,63 (g/cm ³)

4.2.3 Aditivo

Foi utilizado aditivo superplastificante de 3ª geração, também chamado de redutor de água de alta eficiência, na produção dos blocos de argamassa. O aditivo tem como base uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando superplastificação e alta redução de água. Como consequência, em teoria, obtém-se um material cimentício com maior trabalhabilidade e sem alteração no tempo de pega. Um dos motivos para a sua utilização é devido à sua propriedade de redução de água, de modificação da viscosidade e também aumento da trabalhabilidade de misturas à base de cimento no estado fresco.

Segundo o fabricante, o aditivo é compatível com todos os tipos de cimento Portland (CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V), atendendo os requisitos das normas brasileiras NBR 11768 (ABNT, 2001) e ASTM C494 (2013). Segundo especificações ele deve ser utilizado nas

dosagens de 0,2 a 1,0% sobre a massa do cimento. Sua caracterização pode ser encontrada na Tabela 10.

Tabela 10: Caracterização físico-química do aditivo

Teste	Método BASF*	Especificação	Unidade
Aparência	TM 761B	Líquido branco turvo	Visual
pH	TM 112B	5 – 7	-
Densidade	TM 103B	1,067 – 1,107	g/cm ³
Sólidos	TM 613B	28,5 – 31,5	%
Viscosidade	TM 117	< 150	cps

*método adotado pela empresa química responsável pelos testes

De acordo com o fabricante, durante a aplicação o aditivo deve ser adicionado após o final da mistura dos componentes da argamassa (cimento, agregado miúdo e água), ou juntamente com a segunda parte da água de amassamento que será utilizada na mistura.

4.2.4 Adição

A sílica ativa é um resíduo do processo de produção do silício metálico ou do ferro silício, de onde é originado o gás SiO, que ao sair do forno elétrico oxida-se, formando o SiO₂. Este então é captado por filtros e armazenado em silos para a sua comercialização.

Na manipulação da argamassa no estado fresco foi utilizada sílica ativa como substituição parcial em 10% (massa) do cimento a fim de melhorar a trabalhabilidade, evitar a segregação, aumentar a coesão, reduzir a permeabilidade, aumentar a aderência fibra/matriz, entre outros. Segundo o fabricante, a utilização entre 5 e 12% da sílica ativa em relação à massa do cimento altera profundamente as características da mistura, tanto no estado fresco quanto no endurecido. Estas mudanças estão relacionadas tanto à ação pozolânica quanto ao efeito de microfíler (refinação dos poros das misturas cimentícias, reduzindo os espaços vazios devido à elevada finura da sílica).

Entretanto, nesta pesquisa buscou-se utilizar este componente fundamentalmente para realizar uma mistura fluída (juntamente com o emprego de aditivo superplastificante) a fim de

compensar a maior superfície específica em relação ao cimento sem que haja exsudação e segregação em função do aumento de coesão.

Como os CP's com teor de 5% de FOP's ordenadas (a fim de diminuir ao máximo a variabilidade do experimento) mostraram-se extremamente complexos durante o seu processo de moldagem devido à alta densidade das fibras, foi decidido utilizar uma argamassa fluída com sílica ativa como material fino. A sílica ativa possui como base química o dióxido de silício e cor cinza claro ao olho nu. As características físicas e químicas deste material estão apresentadas nas Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11: Caracterização química da sílica ativa

Elemento químico	Teor (%)
SiO ₂	95,00
Al ₂ O ₃	0,07
Fe ₂ O ₃	0,04
CaO	0,17
MgO	0,42
TiO ₂	0,01
Na ₂ O	0,53
K ₂ O	0,47

*caracterização fornecida pelo fabricante do material

Tabela 12: Caracterização física da sílica ativa

Parâmetro	Valor
Massa específica	2,24 g/cm ³
Superfície específica	20,05 m ² /g
Diâmetro médio	0,19 µm

*caracterização fornecida pelo fabricante do material

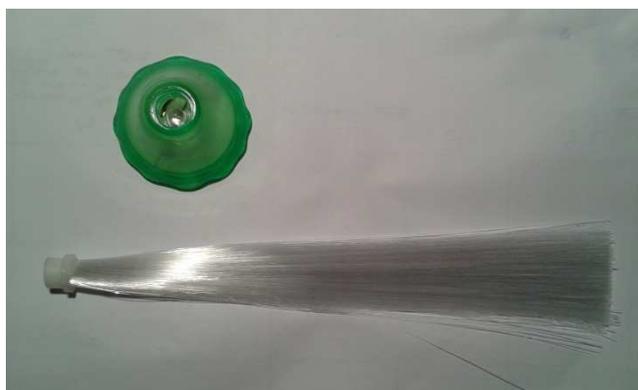
4.2.5 Água

A água utilizada para a execução dos corpos de prova de argamassa foi a disponibilizada para o abastecimento local, fornecida pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre (DMAE).

4.2.6 FOP

A fibra óptica utilizada foi obtida através de uma empresa brasileira atacadista e distribuidora de luminárias fabricadas na China, não sendo possível obter informações do fabricante e composição do material, *a priori*. No Brasil também há a possibilidade de comprar fibra por rolo de empresas especializadas em transmissão de dados, entretanto devido ao alto custo e consequente inviabilidade comercial de utilização na construção civil esta opção foi descartada. Na Figura 24 observa-se que o maço de fibras, com comprimento de aproximadamente 30 cm, é facilmente separado da base da luminária. O processo de desmontagem não apresentou qualquer risco de danos às FOP's.

Figura 24: luminária de origem chinesa com a base separada do feixe de fibras ópticas.



A escolha da fibra óptica polimérica ao invés da fibra óptica de vidro levou em conta a sua maior flexibilidade, facilidade de corte e maior disponibilidade no mercado. Fibras óticas de vidro tendem a ser mais espessas devido à sua capa protetora e se forem muito curvadas podem quebrar facilmente. Segundo Uribe (2010), a fibra óptica polimérica apresenta maior flexibilidade, menor custo e potencialmente maior resistência ao meio alcalino quando comparada com a fibra óptica de vidro.

4.2.6.1 Propriedades e desempenho

As análises nas FOP foram realizadas antes e depois destas serem inseridas nas misturas de argamassa. No caso das análises somente da fibra, descritas no programa experimental, buscou-se verificar as propriedades intrínsecas do material que estão apresentadas a seguir. Já

a influência da interação das fibras no compósito, o aspecto micro estrutural da argamassa e a interface FOP-matriz estão apresentados no Capítulo5.

4.2.6.2 Caracterização superficial – MEV

A caracterização superficial das fibras foi a primeira etapa para a confecção dos compósitos translúcidos. Através das análises superficiais foram estabelecidas as quantidades exatas de FOP para cada teor adotado. Inicialmente foi cogitado utilizar apenas a Microscopia Ótica (MO), entretanto foi decidido que a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) seria a mais adequada devido à sua grande precisão.

A microscopia eletrônica de varredura é utilizada em várias áreas do conhecimento, incluindo a Engenharia Civil. A aplicação do método de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em materiais consiste na obtenção de imagens de amostras e na posterior digitalização, binarização e tratamento destas imagens. O MEV é geralmente utilizado para observações de amostras espessas, ou seja, basicamente não transparente a elétrons. A razão principal de sua utilização está associada à alta resolução que pode ser atingida, atualmente da ordem de 3,0nm, e à grande profundidade do foco, da ordem de 300 vezes melhor do que a do microscópio óptico (MO), resultando em imagens com aparência tridimensional quando analisados por elétrons secundários (KIRCHHEIM, 2008).

A caracterização superficial da FOP foi feita no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFRGS. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura do fabricante JEOL, modelo JSM 6060, como se observa na Figura 25.

Figura 25: Microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado e pertencente ao CME/UFRGS.

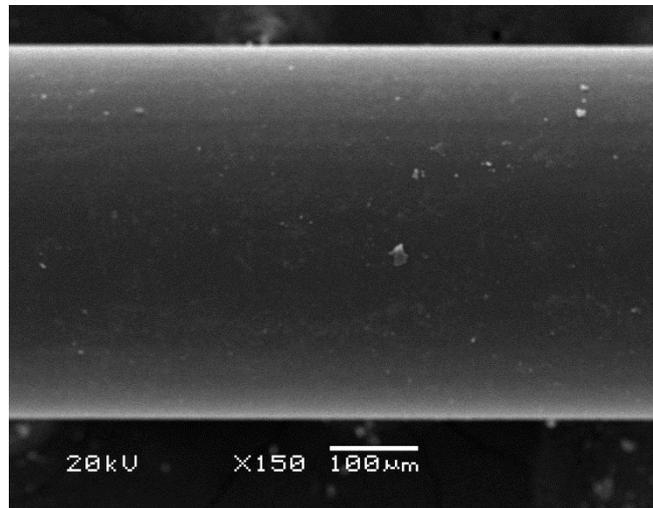


Na microscopia eletrônica a área ou micro volume a ser analisado é irradiado por um fino feixe de elétrons ao invés da radiação da luz. Como resultado da interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra, uma série de radiações são emitidas tais como: elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios-X característicos, elétrons Auger, fótons, etc. Estas radiações, quando captadas corretamente, irão fornecer informações características sobre a amostra como, por exemplo: topografia da superfície, composição, cristalografia, entre outros (MALISKA, 2007).

4.2.6.3 Textura superficial

Na caracterização superficial qualitativa das FOP através do MEV (Figura 26), verificou-se que as fibras apresentam uma superfície muito lisa com quase nenhum defeito de fabricação como, por exemplo, microfissuras, variação de diâmetro para o mesmo fio, rugosidades, entre outros. A ausência destas falhas de fabricação pode ser um indicativo de fibra com boa qualidade e baixa perda de transmissão.

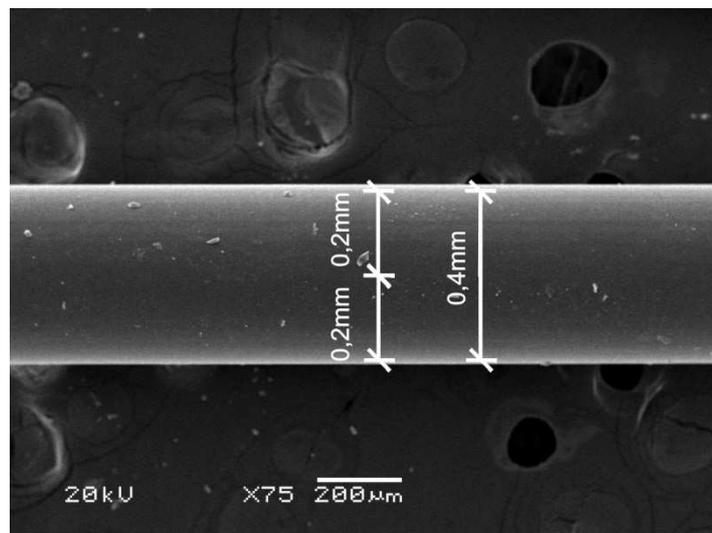
Figura 26: Textura superficial da FOP obtida por MEV (elétrons secundários).
Magnificação: 150 vezes.



4.2.6.4 Diâmetro

A verificação do diâmetro das FOP foi de grande importância. Através desta informação foram calculadas as quantidades de fibras para cada um dos três teores adotados nos corpos de prova. O diâmetro apresentou uma espessura média de 0,4 mm (400µm), como pode ser observado na Figura 27.

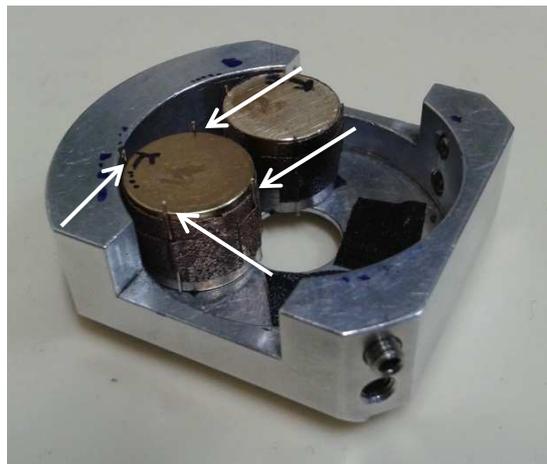
Figura 27: Diâmetro médio das FOP obtido por MEV (elétrons secundários).
Magnificação: 75 vezes.



4.2.6.5 Influência qualitativa do tipo de corte nas FOP's

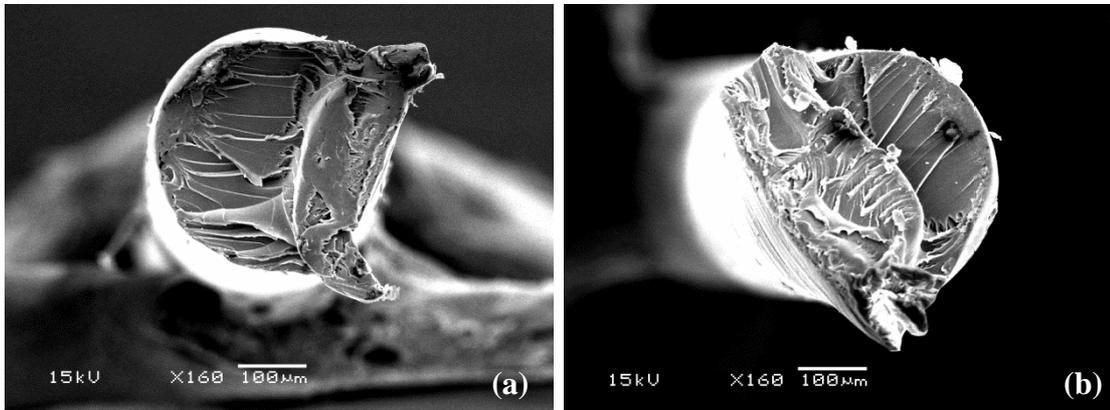
A fim de avaliar a influência de diferentes tipos de cortes nas superfícies das pontas das FOP, que podem ser executados dependendo da técnica adotada, foram analisados no MEV cortes com: tesoura, estilete e serra. Para cada tipo de corte foram separadas quatro amostras de FOP para análise no MEV. Cada segmento de fibra foi cortado com um comprimento de aproximadamente 1,5cm e conseqüentemente metalizado com uma camada de ouro. Após a metalização, as amostras foram fixadas verticalmente (para análise na face de topo) nos *stubs* do MEV com uma fita de carbono (Figura 28). No microscópio foi utilizado o alto vácuo (*high vacuum*) para as análises.

Figura 28: Amostras de FOP fixadas verticalmente com fita de carbono no *stub* (indicação, através de setas, da posição de cada uma das fibras).



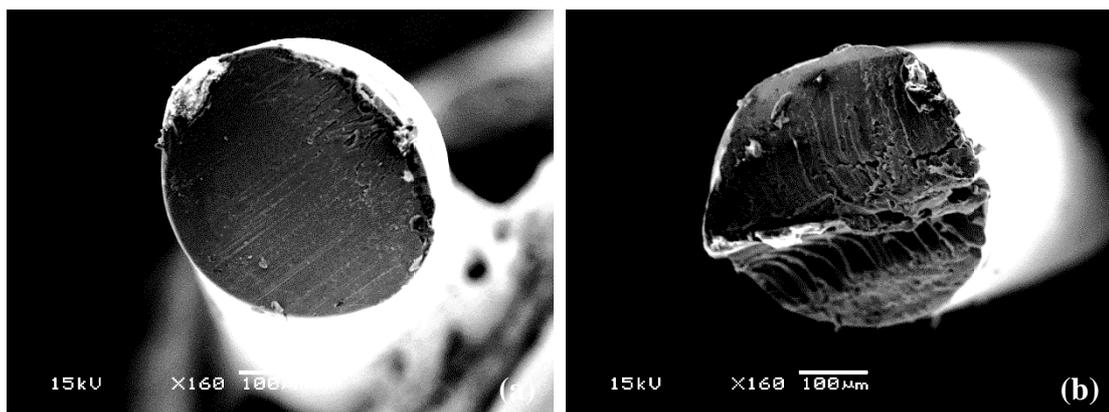
Na Figura 29 se observa as deformações nas pontas das amostras das fibras geradas por corte com tesoura em uma hipotética técnica utilizada para a confecção do concreto translúcido. Percebe-se que há um esmagamento e grande deformação nas pontas das FOP's. Das três técnicas avaliadas esta, do ponto de vista qualitativo, foi a que apresentou maior agressividade.

Figura 29: influência superficial do corte com tesoura obtida por MEV (elétrons secundários):
 (a) amostra 01; (b) amostra 02. Magnificação: 160 vezes.



Na Figura 30 é possível verificar o resultado gerado na ponta da fibra por corte com estilete. Em termos comparativos com o corte com tesoura, este método aparentemente mostra-se menos agressivo. Há um esmagamento na ponta da fibra, entretanto com uma deformação consideravelmente menor.

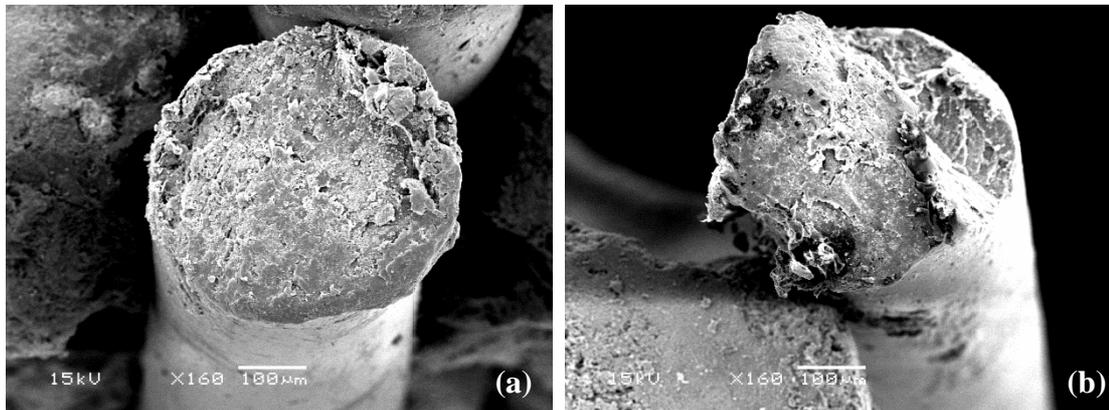
Figura 30: influência superficial do corte com estilete obtida por MEV (elétrons secundários):
 (a) amostra 01; (b) amostra 02. Magnificação: 160 vezes.



Diferentemente dos dois métodos anteriores onde as fibras foram cortadas individualmente, o método de corte com serra de argamassa foi executado com a FOP já inserida na argamassa endurecida. Na Figura 31 observa-se que, provavelmente, durante o corte uma camada de pó de cimento ficou depositada na superfície das pontas das FOP. Aparentemente não houve

grande deformação nas pontas das fibras, mas é possível que esta camada de pó prejudique a transmitância de luz.

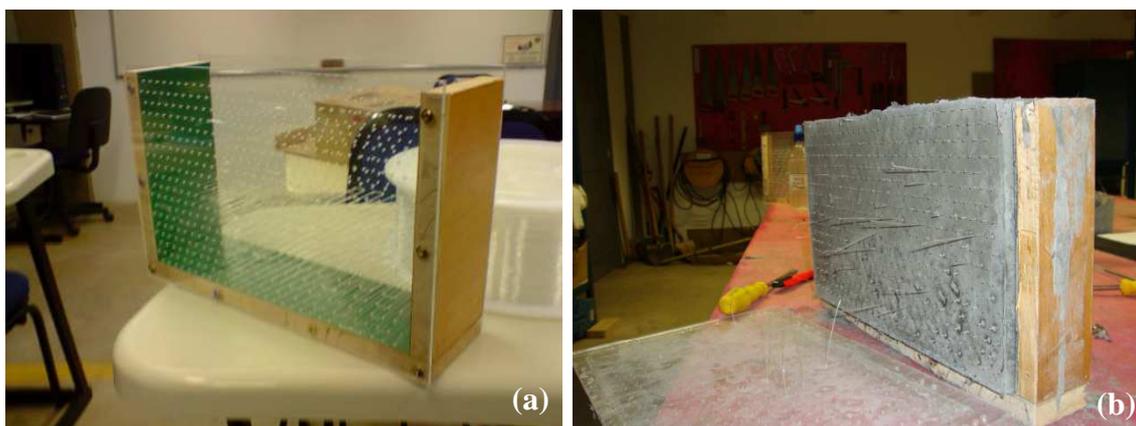
Figura 31: influência superficial do corte obtida por MEV (elétrons secundários): (a) amostra 01; (b) amostra 02. Magnificação: 160 vezes.



É importante salientar que a análise qualitativa dos métodos de corte de FOP tem como objetivo verificar o quanto a ponta da fibra deforma-se. Conseqüentemente, quanto maior a deformação, em teoria, mais prejudicada a passagem de luz estará em relação a um método que preserve melhor a integridade da fibra.

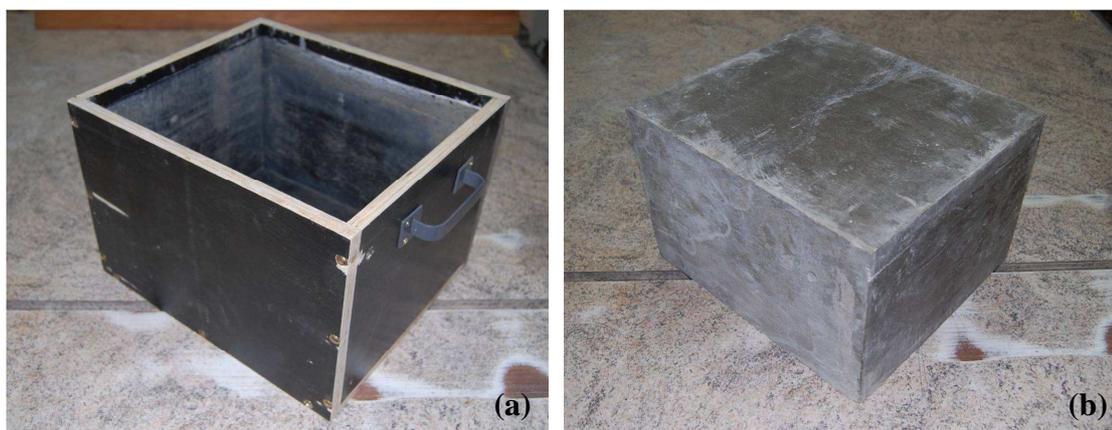
O método de corte com tesoura ou estilete pode ser aplicado para a produção de peças translúcidas de forma mais artesanal, com fôrmas individuais para cada bloco. Este é indicado principalmente para a execução de blocos com FOP's ordenadas. Utilizando fôrmas com placas de acrílico perfuradas, após a desmoldagem cada fibra deve ser cortada individualmente rente à face do bloco (Figura 32).

Figura 32: fôrma para produção de um bloco translúcido com fibras ordenadas: (a) transpasse das fibras; (b) bloco durante a desfôrma (BECKER *et. al.*, 2010).



Já a execução de blocos com FOP's cortadas através de serra é considerada como a mais viável para a produção em escala industrial. Este método de corte é indicado para a execução de peças com FOP's aleatórias. Utilizando uma fôrma convencional, é feito inicialmente um grande bloco com fibras dispostas aleatoriamente, o qual é cortado com serra, gerando peças menores de concreto translúcido (Figura 33).

Figura 33: produção de blocos translúcidos com fibras aleatórias: (a) fôrma utilizada para a confecção; (b) bloco translúcido antes do corte (MARQUETTO e TUTIKIAN, 2011).

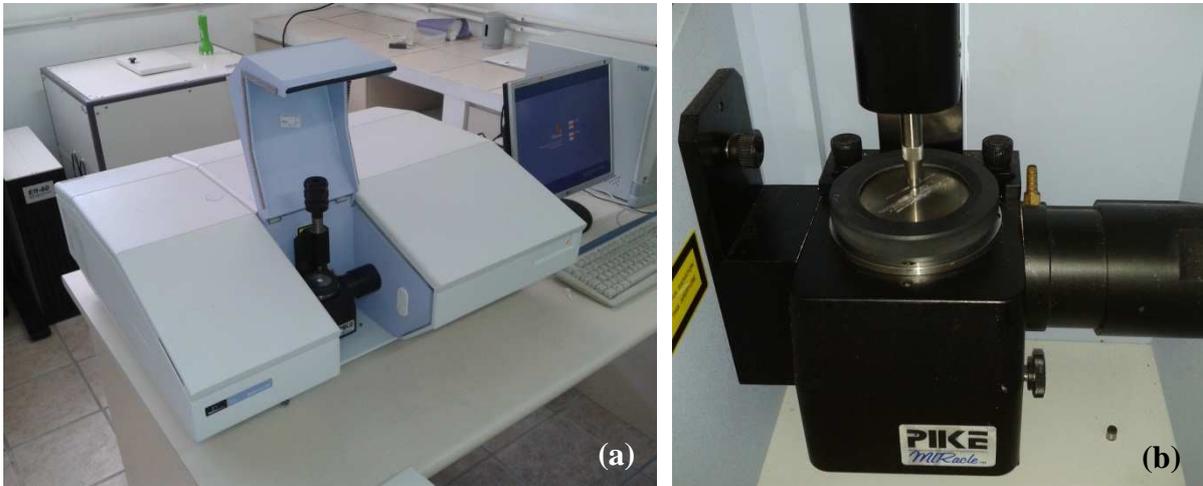


4.2.6.6 Espectroscopia no Infravermelho

Como a fibra óptica adquirida para realização desta pesquisa tem origem em luminárias chinesas não foi possível, *a priori*, obter qualquer tipo de caracterização físico-química do fabricante. Dessa forma, foi necessário utilizar o ensaio de espectroscopia no infravermelho a fim de se obter um espectro padrão e poder compará-lo com o resultado de outras pesquisas. Como já dito anteriormente a matéria-prima das FOP's, em geral, são de PS, PC ou PMMA.

A caracterização das FOP's foi feita no equipamento Spectrum BX FTIR, do fabricante PerkinElmer. O aparelho pertence ao LASOM (Laboratório de Síntese Orgânica e Medicinal) da Faculdade de Farmácia da UFRGS. Inicialmente as amostras de FOP foram cortadas em tamanho aproximado de 3 cm e lavadas com acetona a fim de remover qualquer tipo de gordura ou sujeira devido ao manuseio. Depois foram colocadas no espectrômetro para respectiva análise (Figura 34).

Figura 34: análise da FOP: (a) espectrômetro Spectrum BX FTIR utilizado nos ensaios; (b) amostra sendo analisada pelo leitor de infravermelho.



No início do ensaio foi realizada uma leitura de infravermelho sem a amostra de FOP a fim de descontar o espectro de cela do resultado final. Posteriormente, foram executadas 10 leituras sucessivas na mesma amostra para obter um espectro com maior fidelidade. O resultado obtido pode ser observado na Figura 35 e as bandas de onda na Tabela 13.

Figura 35: espectro de infravermelho na FOP.

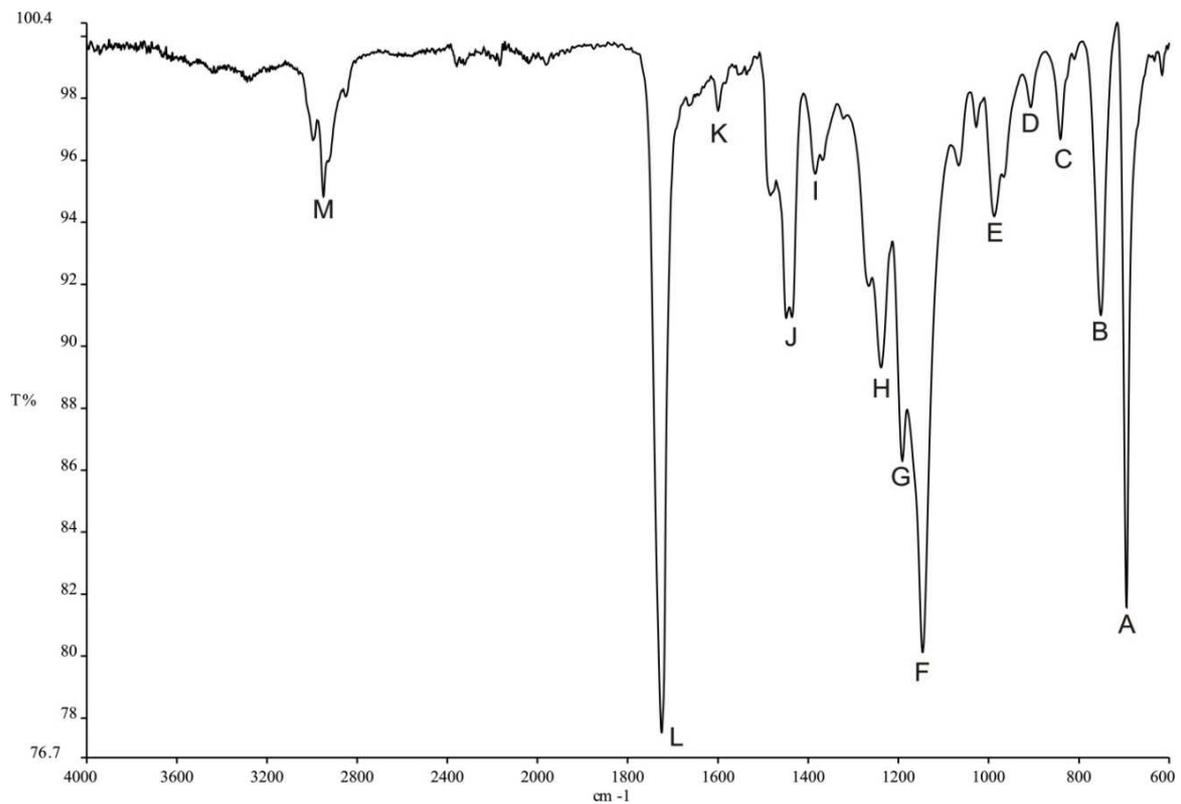


Tabela 13: Análise das bandas do espectro de infravermelho obtido das FOP's.

Ponto	Número de onda (cm^{-1})
A	694,55
B	751,45
C	840,80
D	906,60
E	987,76
F	1146,34
G	1191,44
H	1238,35
I	1384,11
J	1448,76
K	1599,51
L	1724,68
M	2949,08

De acordo com Uribe (2010), o tipo PMMA é o material mais utilizado na fabricação de FOP. Entretanto, comparando o espectro de infravermelho da FOP utilizada nesta pesquisa com o espectro de FOP tipo PS (Anexo J) realizado por Uribe (2010) e com o espectro de FOP tipo PMMA (Anexo J) obtido por Ramesh *et. al* (2007), pode-se dizer que é provável que a fibra usada seja polimérica do tipo PS.

4.2.6.7 Desempenho mecânico

A fim de realizar uma avaliação das propriedades mecânicas da FOP foi realizado o ensaio de tração conforme a norma ASTM D3822/99, com uma taxa de deslocamento de 1 mm/min. Os ensaios foram executados no equipamento Instron 5585 H (Figura 36) pertencente ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS.

Figura 36: ensaio de tração na FOP: (a) equipamento utilizado; (b) FOP sendo tracionada.



Foram utilizadas cinco amostras com 200mm de comprimento livre no ensaio de tração. Na Tabela 14 observam-se os resultados correspondentes à carga máxima, com os respectivos valores individuais e a média da população.

Tabela 14: Ensaio individuais de resistência à tração das FOP's.

Amostra	Carga Máxima (N)	Limite de Resistência (MPa)
1	10,93	120,37
2	10,95	107,58
3	9,93	109,38
4	10,37	114,26
5	13,70	109,05
média	11,18	112,128
desv. padrão	1,32	4,69 %
coefic. de variação	11,79 %	4,19%

4.2.6.8 Recomendações em relação ao manuseio

Em comparação com as fibras ópticas de vidro, as FOP apresentam vantagens em relação ao manuseio. Segundo Uribe (2010), a fibra óptica polimérica apresenta maior flexibilidade, menor custo e potencialmente maior resistência ao meio alcalino, quando comparada com as fibras ópticas de vidro. Entretanto, cuidados como evitar dobrar as fibras, evitar o acúmulo de pó ou sujidade na sua superfície, não expor a altas temperaturas, entre outros, são essenciais durante o seu manuseio.

4.2.6.9 Emprego na construção civil

Apesar de ser amplamente utilizada em sistemas de transmissões de dados no setor da comunicação, na construção civil a fibra óptica ainda anda a passos curtos, com alguns protótipos de concreto translúcido construídos principalmente na Europa e nos Estados Unidos. O objetivo da presente pesquisa é investigar a influência da adição de fibra nas matrizes cimentícias, como já foi discutido no capítulo 1.

Neste trabalho as fibras são dispostas paralelamente entre si nas misturas cimentícias de forma a possibilitar a transmissão de luminosidade da superfície iluminada para a superfície oposta. Assim, utilizando diferentes variáveis da mesma fibra na matriz, pretende-se avaliar se esta atua de forma indiferente ou se age melhorando ou piorando o compósito.

No Brasil os segmentos de fibra podem ser obtidos por rolo de empresas que trazem do exterior este material ou ainda de luminárias importadas. Entretanto, devido ao custo elevado da fibra óptica de vidro obtida por rolo (proporcionalmente até 20 vezes mais caro que as luminárias), para o campo da construção civil, interessado apenas na transmissão de luz e não de dados, as fibras ópticas plásticas obtidas por luminárias podem ser consideradas de qualidade satisfatória para o seu emprego em placas translúcidas.

Tendo como base, os benefícios obtidos por outros tipos de fibras, é esperado que a incorporação de fibra óptica possibilite no compósito um aumento da capacidade de carga, maior restrição à deformação, aumento da ductilidade, entre outros. Assim sendo, apesar de ter possuir um elevado custo e ainda existirem suspeitas quanto à sua aderência na argamassa e as sua influência nas propriedades mecânicas do compósito, a boa durabilidade inerente aos

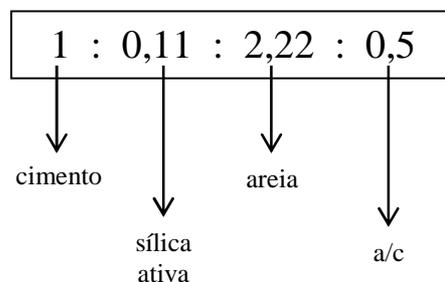
materiais poliméricos parece apontar que a sua utilização em meios alcalinos para a produção de placas translúcidas é viável.

4.3 Caracterização da argamassa no estado fresco

A fim de preencher os espaços entre as densas camadas de FOP, foram feitos diversos testes de dosagem de argamassas até chegar a um resultado satisfatório que preenchesse principalmente os requisitos de: consistência e fluidez capaz de preencher ao máximo possível os espaços entre as FOP's sem qualquer tipo de segregação, podendo assim garantir uma boa moldagem dos CP's. Para tanto, inicialmente foram utilizados moldes com 5% de FOP, na busca pela pior situação de execução dos corpos de prova prismáticos translúcidos como parâmetro para a definição do traço da argamassa.

Foi adotado um único traço, representado na Figura 37, sendo que ainda foi utilizado aditivo superplastificante de 3ª geração na proporção de 1,25% (acima da limitação de 1,0% recomendada pelo fabricante) sobre a massa do cimento.

Figura 37: Apresentação do traço fixo da argamassa utilizada (em massa).



A seguir, estão demonstrados os resultados dos ensaios realizados na argamassa no estado fresco e sem a incorporação das fibras ópticas. Estas foram adicionadas apenas no momento da confecção do corpo de prova.

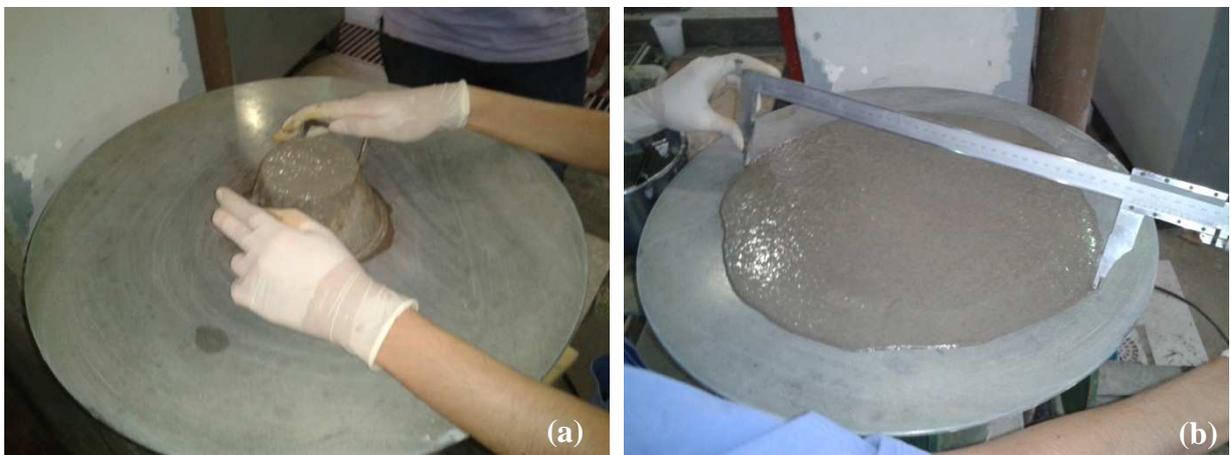
4.3.1 Índice de consistência

Diversos autores classificam as argamassas, segundo a consistência, em secas (a pasta preenche os vazios entre os grãos), plásticas (a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados) e fluídas (os grãos ficam imersos na

pasta). A consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo influenciada pelos seguintes fatores: relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante (SILVA, 2006).

O ensaio do índice de consistência é um método relativamente simples e rápido que possibilita avaliar a fluidez e trabalhabilidade de uma argamassa. Na Figura 38 estão ilustradas imagens do ensaio realizado.

Figura 38: ensaio realizado de determinação do índice de consistência - NBR 13276 (ABNT 2005): (a) preenchimento do molde com argamassa; (b) medição do espalhamento da mistura.



Segundo Silva (2008), as argamassas podem ser classificadas quantitativamente quanto ao índice de consistência (IC) da seguinte forma:

- secas: argamassas cujo IC é inferior a 250 mm (ex. argamassa para contra-piso);
- plásticas: argamassas cujo IC está entre 260 e 300 mm (ex. argamassa de emboço);
- fluídas: argamassas cujo IC é superior a 360 mm (ex. chapisco).

4.3.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

O ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado basicamente resume-se na pesagem de uma amostra de argamassa acondicionada em um molde cilíndrico metálico, com volume aproximado de 400cm³. Na Figura 39 estão ilustradas imagens do ensaio executado.

Figura 39: ensaio realizado de densidade de massa e do teor de ar incorporado - NBR 13278 (ABNT, 2005): (a) pesagem inicial do molde vazio e placa de vidro utilizada; (b) compactação de argamassa no molde metálico.



4.4 Método de execução dos corpos de prova de argamassa

Conforme o diagrama do método de pesquisa, ilustrado na Figura 23 (capítulo 4), foram executados corpos de prova com fibras aleatórias e fibras dispostas ordenadamente. Para cada um dos dois tipos de execução foram utilizados três diferentes teores de fibras e consequentemente desenvolvido um método de produção o qual buscasse o melhor resultado em termos de qualidade visual do produto final, principalmente em relação aos vazios (bolhas de ar).

4.4.1 Método de preparo dos CP's com fibras ordenadas

A fim possibilitar a melhor maneira de distribuir as fibras uniformemente nos CP's de argamassa (4x4x16cm), placas de acrílico perfuradas a laser foram encomendadas sob medida de uma empresa especializada. No Anexo A pode ser visualizado o projeto para os três diferentes teores de FOP encomendados junto ao fabricante e também a qualidade estética resultante dos corpos de prova.

Para cada teor de FOP foram produzidos quatro corpos de prova. O trabalho de colocação das fibras nos orifícios das placas foi feito manualmente e para travar a ponta, cada fibra foi levemente queimada. Após a execução dos moldes de argamassa, a parte derretida foi

completamente removida não interferindo, desta forma, na transmitância de luz no restante das FOP's nos corpos de prova. Na Figura 40 observam-se algumas etapas do processo e o resultado final das placas com as fibras já inseridas e uniformemente distribuídas.

Figura 40: processo de organização das FOP's nas placas de acrílico: (a) inserção das fibras na placa; (b) preparo da ponta da fibra para o seu travamento; (c) e (d) disposição final das FOP's nas placas.



Como já dito anteriormente, este método de produção com fibras dispostas equidistantes entre si busca a sua melhor distribuição possível nos corpos de prova. Com uma boa organização, sem o acúmulo ou falta de FOP em determinados pontos, busca-se avaliar através de ensaios um experimento com a menor variabilidade experimental possível nos resultados.

Devido à alta densidade das fibras nos moldes foram feitas diversas tentativas até chegar ao melhor método encontrado para a moldagem dos corpos de prova (Figura 41). A mudança mais importante com relação ao normalizado método de moldagem de argamassa foi a

verticalização do sistema. Como a montagem do molde envolve placas de acrílico perfuradas e também uma peça de compensado naval, foi utilizado silicone para vedar qualquer tipo de abertura e possível vazamento de material durante a moldagem. Como o fabricante do silicone recomenda um período de cura de 24 horas, todos os moldes foram preparados, pelo menos, um dia antes das moldagens. Um cuidado extra neste processo foi com relação ao desmoldante, o qual se procurou evitar que entrasse em contato com as fibras.

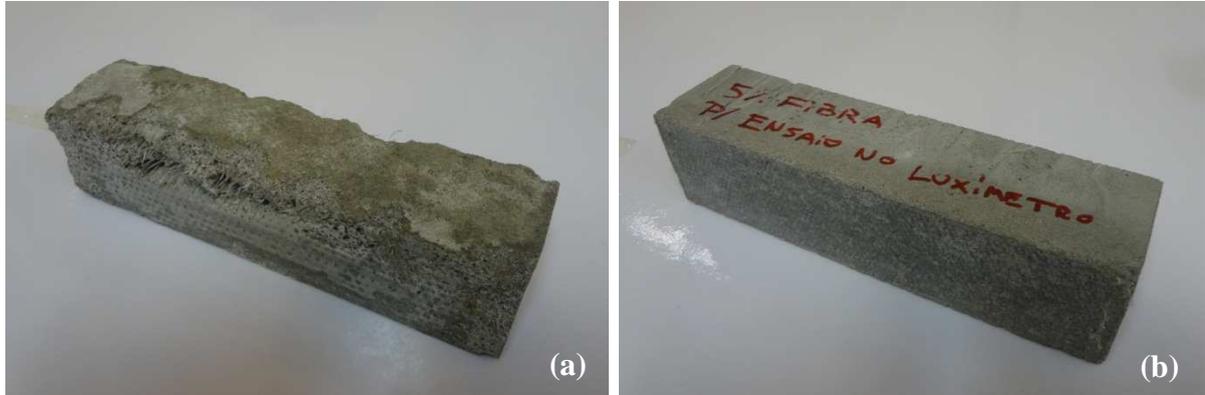
Figura 41: processo de colocação das fibras nos moldes metálicos: (a) utilização de silicone para vedar qualquer tipo de abertura; (b) fixação e respectiva vedação de peça de compensado naval no molde metálico; (c) sistema em repouso por pelo menos 24 horas para a moldagem dos CP's.



4.4.1.1 Moldagem dos corpos de prova com fibras ordenadas

Durante as diversas tentativas de moldagem foi possível verificar que a argamassa no estado fresco possui uma capacidade de preenchimento dos espaços entre as fibras consideravelmente melhor com o molde no sistema vertical do que em relação ao mesmo no sistema horizontal (Figura 42).

Figura 42: resultado dos dois métodos de moldagem experimentados: (a) corpo de prova com FOP executado através do método convencional (horizontal); (b) corpo de prova com FOP feito através do sistema proposto (vertical).



Durante o processo da moldagem destes CP's também foi utilizado um artefato de vibração desenvolvido durante a pesquisa. Este (Figura 43) é composto por um controle manual de intensidade vibratória, alimentado por duas pilhas tamanho AA ligado por um fio a um mini rotor com uma haste metálica na ponta. O aparelho foi utilizado como um vibrador de imersão na argamassa.

Figura 43: aparelho, desenvolvido na pesquisa, para a vibração por imersão na argamassa

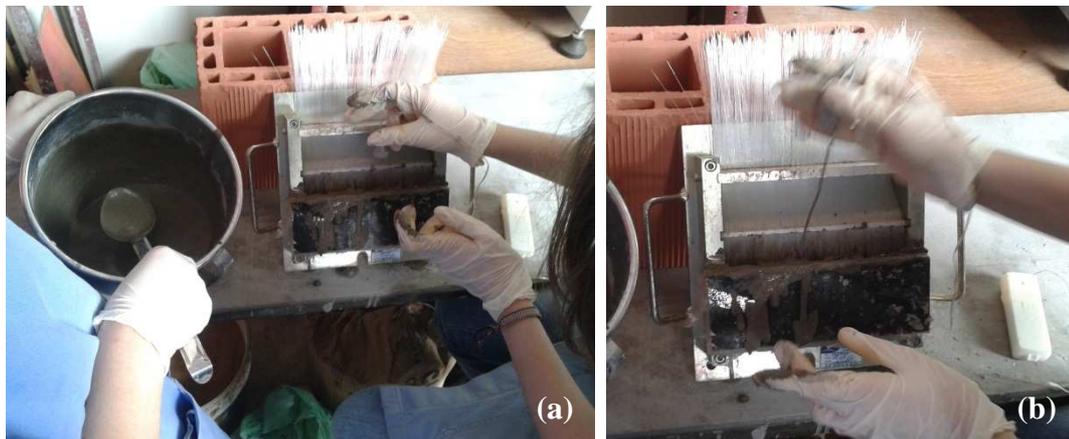


Testes anteriores feitos com o mesmo molde, mas utilizando mesas vibratórias, não se mostraram tão eficientes quanto ao vibrador de imersão. Quando todo o sistema (fôrma, argamassa e fibras) foi vibrado, em muitos casos houve perda de pasta/argamassa por danos

causados pela grande vibração nas vedações da fôrma. Além disso, visualmente no estado endurecido os corpos de prova apresentaram muitos poros na superfície.

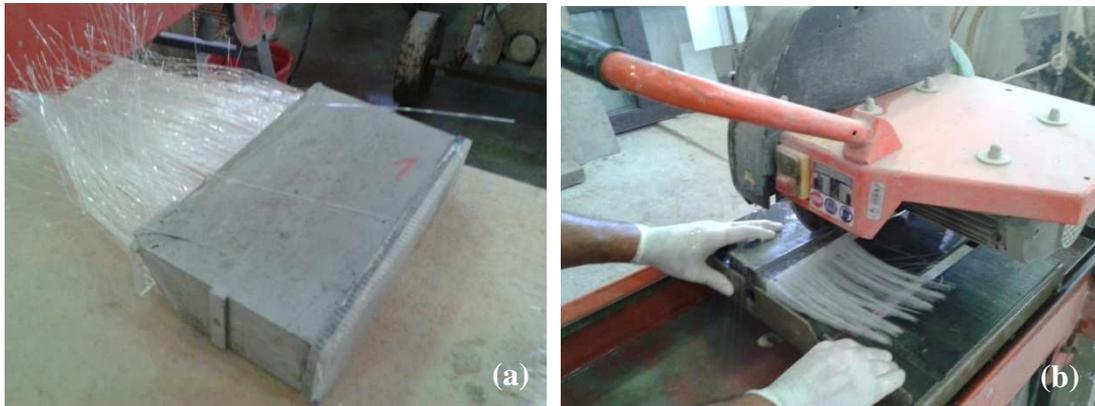
Os CP's prismáticos com fibra podem ser uma analogia a uma viga com alta densidade de armadura, onde o preenchimento de todos os espaços a fim de evitar "bicheiras" é o maior desafio durante a concretagem. O tempo de vibração foi definido através da visualização e experiência do operador, ou seja, foi vibrado antes que houvesse qualquer indício de segregação da argamassa e até quando as bolhas de ar parassem de subir para a superfície. Na Figura 44 observa-se o processo de moldagem dos corpos de prova prismáticos.

Figura 44: execução dos compósitos: (a) moldagem dos CP's prismáticos com fibras ordenadas; (b) detalhe de como foi feita a vibração.



No dia posterior de cada uma das quatro moldagens (0%, 2%, 3,5% , 5% de FOP) foram feitas as desfôrmas dos blocos gerados e conseqüentemente as remoções manuais das placas de acrílico perfuradas e executado o corte de apenas uma das faces através de serra (Figura 45). A partir de cada bloco talhado foi gerado apenas um CP prismático (4x4x16cm).

Figura 45: confecção do CP com fibras ordenadas: (a) corpo de prova logo após a desmoldagem; (b) corte através de serra de apenas uma das faces do CP prismático.



4.4.2 Método de preparo para execução dos CP's com fibras aleatórias

Em relação ao método com as FOP's ordenadas através das placas perfuradas, o processo utilizado de preparo para a execução dos CP's com fibras aleatórias pode ser considerado relativamente simples. Foi montada uma fôrma com formato de um paralelepípedo (Figura 46) e posteriormente feito um grande bloco de argamassa com fibra óptica. A fim de definir cada teor de FOP, foi calculada a área da sua menor face e assim definido a quantidade de fibras. Estas foram dispostas perpendicularmente à menor superfície calculada. Foi utilizado plástico filme para a posterior desfôrma.

Figura 46: fôrma dimensionada para o exato comprimento da FOP disponível.



4.4.2.1 Moldagem dos corpos de prova com fibras aleatórias

Durante o processo de moldagem, foram despejadas na fôrma uma camada de argamassa e uma camada de fibra repetidamente até o preenchimento total da fôrma (Figura 47). Durante este processo também foi utilizado o artefato de vibração, desenvolvido na pesquisa, para eliminar o máximo possível as bolhas de ar na argamassa. O tempo de vibração foi definido através da visualização e experiência do operador, ou seja, foi vibrado antes que houvesse qualquer indício de segregação da argamassa e quando as bolhas de ar parassem de subir até a superfície.

Figura 47: moldagem “por camadas” dos CP’s com fibras aleatórias: (a) colocação da camada de FOP; (b) colocação da camada de argamassa.



No dia posterior de cada uma das quatro moldagens (0%, 2%, 3,5% , 5% de FOP) foram feitas as desfôrmas dos blocos e conseqüentemente o corte através de serra (Figura 48). A partir de cada grande bloco foram gerados 5 CP’s prismáticos (4x4x16cm).

Figura 48: corte do bloco através de serra.



4.5 Procedimentos adotados no período pós-moldagem dos CP's.

As argamassas produzidas nos dois métodos com quatro teores de FOP (0%, 2%, 3,5% e 5%) em cada um deles, foram moldadas para a avaliação da resistência à tração na flexão e compressão aos 28 dias de idade. Foram produzidos 4 corpos de prova por teor de fibra no método com as FOP's ordenadas e 5 CP's por cada teor de fibra no método com as FOP's dispostas aleatoriamente. A desmoldagem ocorreu após 24 horas à execução e os corpos de prova permaneceram em câmara úmida (com temperatura e umidade controlada) sob imersão até a idade de rompimento.

4.5.1 Ensaio de módulo dinâmico de elasticidade

Equipamentos para medir a velocidade de pulsos ultrassônicos são largamente utilizados, como padrão da indústria, em todo o mundo para análises não destrutivas de concretos e argamassas. Estes têm a capacidade de medir o tempo gasto por um pulso de ultra-som para passar através do material em teste. Ao tomar uma série de leituras é possível detectar a presença de fissuras, vazios e outras imperfeições. Com os dados obtidos pelo aparelho obtêm-se valores indicativos do módulo de elasticidade dinâmica e da resistência do concreto.

A primeira análise feita nos corpos de prova após os 28 dias de cura foi a do módulo dinâmico de elasticidade. O ensaio não destrutivo realizado de acordo com a NBR 15630 (ABNT, 2005) utilizou o aparelho PUNDIT 6 Ultrasonic Tester, do fabricante CMH Ltd e pertencente à CIENTEC (Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul). Inicialmente foi feito um teste de verificação e regulagem do equipamento através de uma barra de referência metálica própria para isso. Depois de verificada a calibração correta foram realizados os ensaios ultrassônicos nos corpos de prova de argamassa (Figura 49). Foi utilizado um gel apropriado (meio de contato) como auxílio para a transmissão ultra-sônica.

Figura 49: equipamento ultrassônico utilizado nos testes: (a) calibração no aparelho feita antes dos ensaios; (b) medição do pulso ultrassônico nos CP's de argamassa.



A norma brasileira NBR 15630 (ABNT, 2008 versão corrigida ABNT, 2009) para argamassas utilizou o mesmo critério de cálculo do módulo de elasticidade dinâmico da norma britânica BS 1881:Part 203:1986:

$$E_d = \rho \cdot V^2 \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu) / (1 - \nu)$$

E_d – Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)

ρ – Densidade do corpo de prova (kg/m^3)

V – Velocidade de pulso (km/s)

ν – Coeficiente de Poisson – adotado igual a 0,2 na norma brasileira.

4.5.2 Ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão

Os ensaios de resistência tração e principalmente à compressão em materiais com base cimentícia podem ser considerados, na maioria dos casos, como as principais análises a fim de avaliar se estes atendem ou não os requisitos propostos. Entre esses dois ensaios, pode-se destacar principalmente o ensaio à compressão por apresentar, geralmente, menor variabilidade nos resultados e também pela própria característica intrínseca das matrizes cimentícias: possuir, em média, uma resistência à compressão de oito a dez vezes maior que a de tração para os corpos de prova com o mesmo traço.

Após os ensaios não destrutivos de módulo dinâmico de elasticidade foi dado prosseguimento às análises destrutivas. Os ensaios de resistência à tração na flexão e de compressão foram executados de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). Foi utilizada a prensa hidráulica do fabricante EMIC, modelo DL 20000 MF (Figura 50), pertencente à CIENTEC/RS. Foi feita a aplicação de carga na velocidade de carregamento de 0,22mm/min para o ensaio de resistência à tração na flexão e de 1,22 mm/min para o ensaio de resistência à compressão.

Figura 50: Prensa hidráulica utilizada nos ensaios de resistência dos CP's de argamassa.



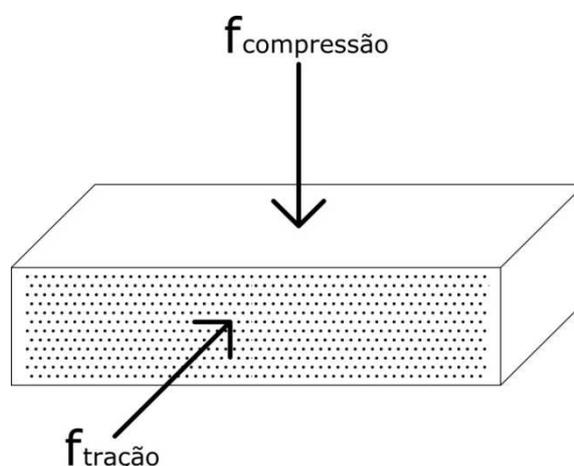
A avaliação da resistência à tração na flexão e à compressão nos diferentes métodos e teores de FOP adotados teve como objetivo avaliar a influência da adição de fibra óptica nas misturas de argamassa, permitindo uma posterior comparação com os testemunhos (0% de FOP) produzidos exatamente no mesmo método de execução. Os resultados destes ensaios executados aos 28 dias podem ser conferidos no Anexo C.

4.5.2.1 Sentido da carga aplicada

Como os CP's possuem fibras dispostas paralelamente entre si de forma aleatória ou ordenada, nos ensaios de resistência à tração na flexão e compressão buscou-se criar uma situação hipotética de uso das placas translúcidas a fim de simular na prensa o comportamento de uso do material. Supondo o uso das placas para empenas verticais, no ensaio de

compressão a carga foi aplicada perpendicularmente às fibras a fim de tentar simular a própria força que as placas translúcidas estariam exercendo umas sobre as outras. Na mesma linha de raciocínio, o ensaio de tração também foi simulado para o caso do uso das placas formando uma superfície vertical. Como paredes tendem eventualmente a receber cargas acidentais no sentido horizontal (impactos) ou até flambagem (se muito esbeltas), o ensaio de tração na flexão foi executado aplicando a carga paralelamente ao sentido das fibras. Na Figura 51 foi feito um esquema demonstrando o sentido da carga aplicada na prensa hidráulica em relação à disposição das fibras.

Figura 51: Esquema demonstrando o sentido em que as cargas foram aplicadas para cada um dos dois tipos de ensaios nos CP's prismáticos.



Também foi estabelecida uma ordem de ensaios, pois além dos já mencionados, os mesmos corpos de prova ainda foram utilizados para os testes de absorção de água por capilaridade. Assim sendo, inicialmente foram executados os ensaios de módulo de elasticidade e logo após o de resistência à tração na flexão. Após o rompimento, o CP ficou dividido em duas metades, as quais uma foi utilizada para o ensaio de compressão e a outra para o de absorção de água por capilaridade.

4.5.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade

Os ensaios de absorção de água são exemplos de testes, não muito aperfeiçoados, capazes de avaliar com simplicidade a durabilidade de materiais cimentícios de modo a prever e evitar a

sua degradação. Grande parte dos compósitos à base de cimento expostos diretamente aos fatores climáticos do meio ambiente tendem a apresentar o fenômeno de absorção de água por capilaridade causada, principalmente, pela chuva. A água pode ser considerada como o principal agente de degradação das edificações (se estas não tiverem o conjunto de um bom projeto, execução e plano de manutenção), originando diversos tipos de mecanismos de degradação como, por exemplo, o transporte de agentes agressivos nela dissolvidos.

A absorção de água é definida como a entrada de água na rede porosa da matriz cimentícia devido às forças capilares, que resultam da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do material e a sua superfície nos poros capilares, sendo dependente do diâmetro capilar. Assim sendo, quanto menor for a absorção do material, mais este estará protegido contra a sua degradação pela água (SILVA, 2010).

O ensaio realizado de acordo com a NBR 15259 (ABNT, 2005) tem como objetivo determinar a absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade da argamassa endurecida. Como já mencionado no item 4.5.2, foi utilizado como corpo de prova uma das duas metades restantes do ensaio de tração na flexão. A absorção de água é expressa pela diferença entre a massa do CP seco e a massa do mesmo após a sua menor face ficar em contato com a água (lâmina de 5 ± 1 mm) por 10 e 90 minutos respectivamente.

A equação para o cálculo da absorção de água por capilaridade, segundo a norma brasileira, é expressa por:

$$A_t = (m_t - m_0)/16$$

A_t – absorção de água por capilaridade, para cada tempo, em gramas por centímetro quadrado

m_t – massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas

m_0 – massa inicial do corpo de prova, em gramas

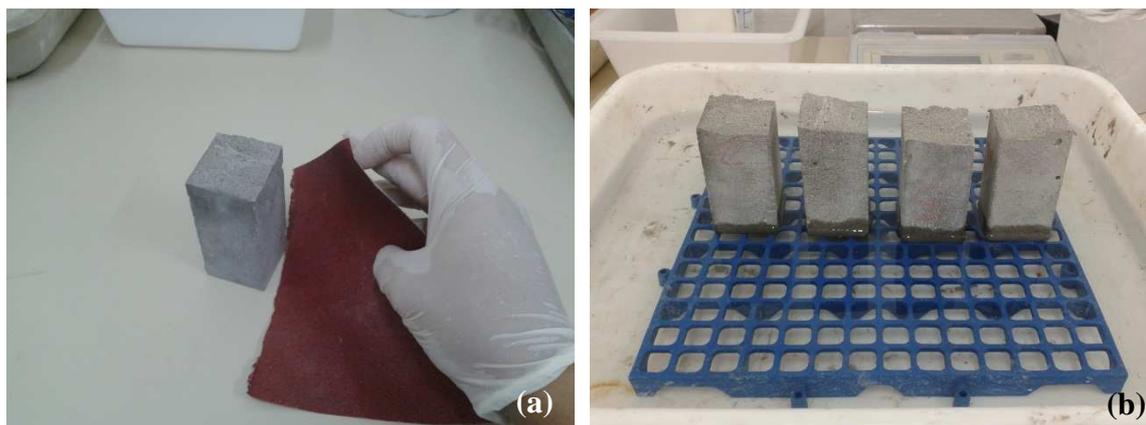
t – corresponde aos tempo de 10 min e 90 min, em segundos

16 – é a área do corpo de prova, em centímetros quadrados.

Já o coeficiente de capilaridade pode ser considerado, segundo a NBR 15259 (ABNT, 2005), como aproximadamente igual ao valor médio das diferenças de massa aos 10 min e aos 90 min. Na Figura 52 observam-se as etapas de preparação dos CP's e o início do ensaio de

absorção de água por capilaridade. No Anexo G, encontram-se as tabelas com todas as medições efetuadas e respectivos cálculos.

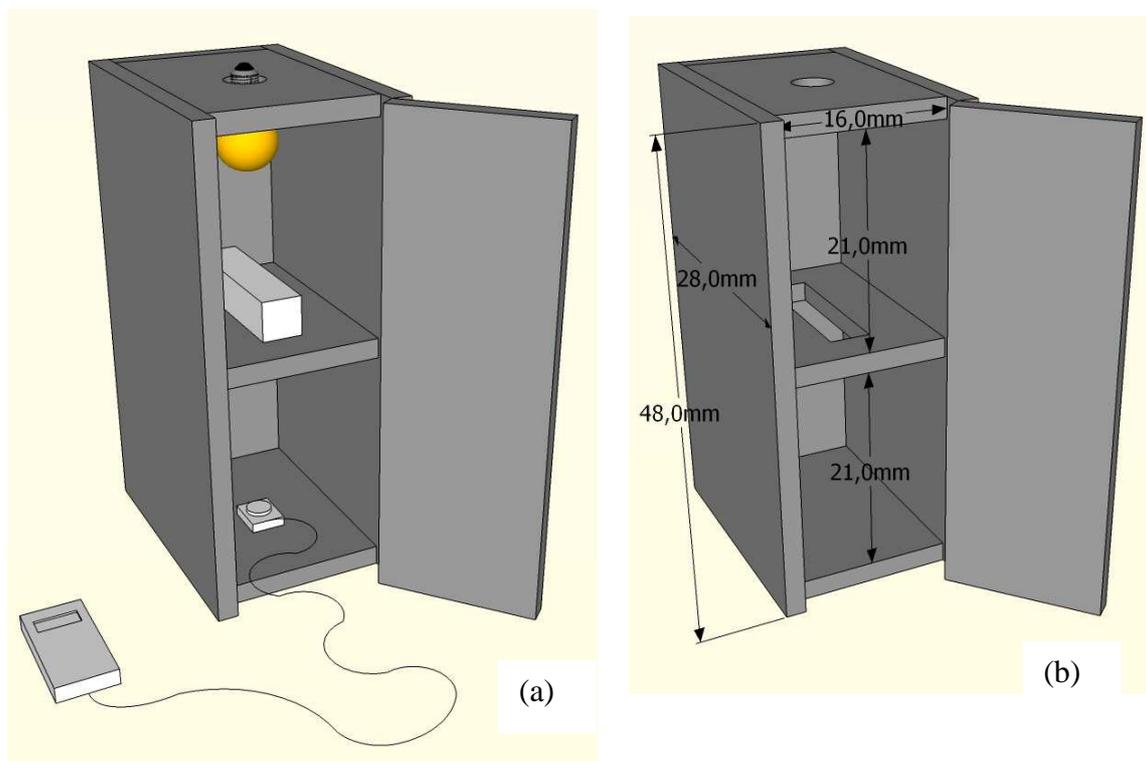
Figura 52: ensaio de absorção de água por capilaridade: (a) etapa inicial de preparar o corpo de prova com lixa grossa; (b) etapa em que o CP é mantido em contato com a água e têm sua massa verificada após 10 e 90 min.



4.5.4 Ensaio transmitância de luz

Para o ensaio de avaliação de transmitância de luz, foi construído, com base no trabalho feito por Uribe (2010), uma artefato de madeira. Este teve como objetivo avaliar a transmitância de luz feita pelos corpos de prova através dos diferentes teores de FOP utilizados. Na Figura 53 pode-se observar que o equipamento construído conta com um orifício no seu topo para a fixação de uma fonte de luz (lâmpada de 100Watts/110Voltz), a parte intermediária possui um suporte com abertura retangular (para a colocação do CP prismático 4x4x16cm) e a parte inferior é reservada para a fotocélula do luxímetro (aparelho utilizado para a medição da transmitância de luz). A caixa foi executada com compensado naval e, posteriormente, foi pintada com tinta guache preta fosca.

Figura 53: projeto do equipamento para medir a transmitância de luz: (a) artefato com fonte luminosa, corpo de prova e luxímetro; (b) dimensões estipuladas.



Inicialmente, para se obter um comparativo, a fonte de luz foi ligada e um CP, sem adição de FOP, foi colocado no suporte. A leitura feita no luxímetro, com a porta do artefato fechada, foi zero (0 lux). Dessa forma pôde-se constatar que a caixa estava corretamente vedada contra a entrada ou vazamento de luz.

Para as leituras efetuadas com os CP's com adição de fibras, um pequeno ajuste teve que ser feito. A fim de melhorar a precisão do ensaio, o sensor fotométrico que inicialmente estava a uma distância de 22cm da superfície do corpo de prova, foi aproximado para 5cm com o auxílio de um suporte (Figura 54). Dessa forma o ensaio comparativo com um CP sem adição de fibra foi refeito e, novamente, o resultado foi 0 lux. Em todas as leituras efetuadas, a porta do aparato estava completamente fechada.

Figura 54: preparação do ensaio para transmitância de luz: (a) vista do aparato inteiro com a adaptação de posição do sensor fotométrico; (b) detalhe da adaptação feita para melhorar a precisão de medição do luxímetro.



O luxímetro utilizado para medir iluminância é um aparelho formado por um sensor fotométrico conectado a um mostrador digital. O modelo utilizado é do fabricante Lutron, modelo LX-101 LUX METER. O equipamento de medição utilizado pesquisa pertence ao LabCon (Laboratório de Conforto Ambiental) da UFRGS.

5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos dos ensaios propostos e descritos no programa experimental estão apresentados em forma de tabelas e gráficos neste capítulo, assim como uma análise da influência das variáveis estudadas.

5.1 Caracterização da argamassa utilizada na confecção dos corpos de prova

Nesta etapa estão apresentados todos os ensaios de caracterização realizados para a argamassa, utilizada para a confecção dos corpos de prova, no estado fresco e endurecido.

5.1.1 Caracterização no estado fresco

A seguir estão apresentados os ensaios realizados no estado fresco das argamassas. É importante salientar que em todos os testes executados no estado fresco as FOP's não estão incorporadas na mistura de argamassa. Não existe uma norma específica de compósitos com esse tipo de fibra com finalidade principal de transmitância de luz.

5.1.1.1 Índice de consistência

A caracterização da argamassa quanto ao índice de consistência foi realizada de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2005). Na Tabela 15 podem-se observar os valores encontrados para o traço de argamassa adotado.

Tabela 15: Índice de consistência na argamassa para o traço fixo adotado.

Argamassa	Índice de consistência (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Amostra do traço fixo adotado	386	385	4,58	1,19
	380			
	389			

De acordo com Silva (2008), argamassas que possuem IC (índice de consistência) superior a 360mm podem ser consideradas como fluídas. Conforme esperado, a utilização de aditivo superplastificante (policarboxílico de 3ª geração) possibilitou este amplo espalhamento da argamassa na mesa de consistência durante o ensaio.

5.1.1.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A caracterização da argamassa quanto à densidade de massa e teor de ar incorporado foi realizada de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005). Na Tabela 16 encontram-se os valores encontrados para o respectivo ensaio.

Tabela 16: Densidade de massa e teor de ar incorporado para o traço fixo adotado.

Argamassa	Densidade de massa (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)
Amostra do traço fixo adotado	1904	14,47

O teor de ar incorporado encontrado na argamassa foi considerado dentro dos limites. Segundo Carasek (2010), argamassas convencionais utilizadas como revestimento, em geral, devem apresentar como parâmetro de dosagem entre 8 e 17% antes a aplicação. Argamassas chamadas de sacrifício, por exemplo, utilizadas em restauros onde intencionalmente são dosadas para descarte podem apresentar em média 25% de teor de ar incorporado.

5.1.2 Caracterização no estado endurecido

A seguir estão apresentados os ensaios realizados no estado endurecido das argamassas. Em todos os testes executados no estado endurecido, as FOP's já estão incorporadas na mistura de argamassa.

5.1.2.1 Resistência à compressão

As médias dos ensaios de resistência à compressão, realizados aos 28 dias, estão apresentadas na Tabela 17 e a ANOVA encontra-se na Tabela 18. No Anexo E estão descritos todos os resultados obtidos e a análise estatística completa dos dados.

Tabela 17: Resistência média à compressão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.

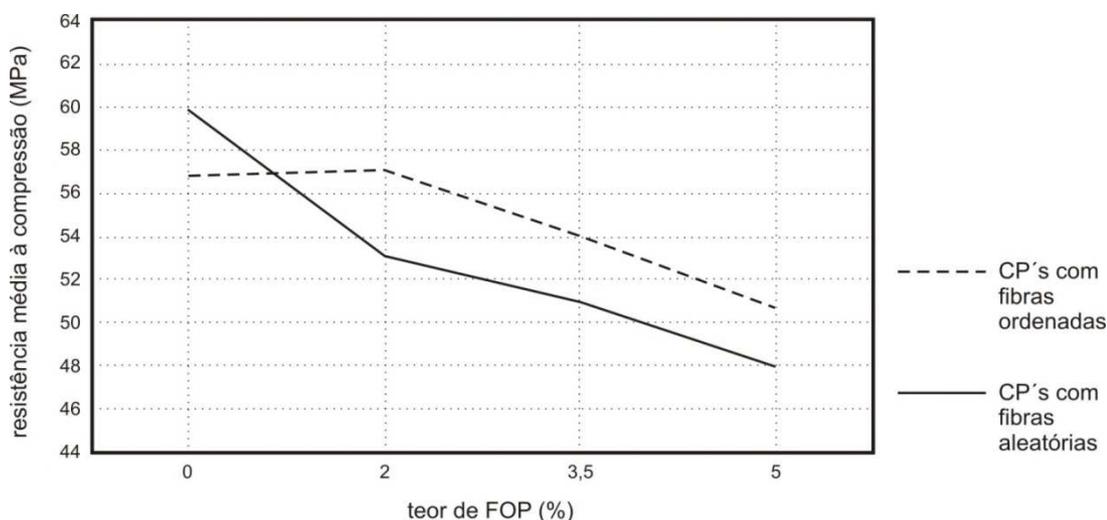
Disposição das fibras	Teor de fibras (%)	Resistência média à compressão (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Ordenadas	0	56,81	1,17	2,06
	2	57,06	1,53	2,68
	3,5	53,99	1,96	3,62
	5	50,64	2,80	5,52
Aleatórias	0	59,90	2,13	3,56
	2	53,06	2,09	3,93
	3,5	50,96	3,28	6,44
	5	47,99	1,53	3,19

Tabela 18: ANOVA da resistência à compressão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabil.	Coment.
A: Teor de fibra	423,847	3	141,282	26,46	0,00%	S
B: Disposição das fibras	23,995	1	23,995	4,49	4,30%	S
AB	68,564	3	22,855	4,28	1,32%	S
Erro	149,526	28	5,340			
TOTAL		35				

Como complemento, na Figura 55 pode-se observar o gráfico dos resultados de resistência média à compressão da argamassa para os 4 teores de FOP adotados. De acordo com o esperado, os corpos de prova moldados com fibras ordenadas apresentaram maior resistência à compressão e menor coeficiente de variação em relação aos que foram executados com as fibras dispostas aleatoriamente.

Figura 55: resistência média à compressão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.



Na Figura 55 observa-se que, com exceção do teor de 0% de FOP, existe uma clara tendência de paralelismo entre os segmentos de reta de resistência média à compressão. Isto é um indicativo que mesmo utilizando dois métodos de execução dos corpos de prova, à medida que são adicionadas as fibras ópticas, a resistência à compressão estatisticamente diminui de forma significativa (Tabela 19). Por ser um método mais cuidadoso de execução, dispo de as fibras de forma ordenada e praticamente equidistante entre si, este método apresentou, em média, uma resistência maior. Entretanto, através da análise completa dos dados encontrada no Anexo E, estatisticamente não existe diferença entre o método de execução de fibras dispostas de forma ordenadas e aleatórias. Esta conclusão, de certa forma, foi surpreendente pois era esperado que o método com fibras ordenadas fosse estatisticamente melhor com relação à resistência à compressão.

O único ponto fora do padrão esperado no gráfico foi para de teor de 0% de FOP no método de execução para fibras ordenadas. Todos os CP's foram rompidos na CIENTEC utilizando o mesmo equipamento. Entretanto, no primeiro dia de rompimento, reparou-se um comportamento estranho por parte do equipamento, como se o mesmo estivesse aplicando carga de forma descontínua. Abortaram-se os primeiros ensaios após uma aplicação de carga. Conseqüentemente, o equipamento teve que ser recalibrado para os ensaios posteriores. Portanto, como os CP's de 0% de FOP com fibras ordenadas foram os primeiros a serem

rompidos, acredita-se que essa aplicação de carga inicial, aborto do ensaio, e nova realização no mesmo corpo de prova tenha gerado este ruído experimental.

De acordo com Marquette e Tutikian (2011), os resultados obtidos de resistência à compressão dos blocos translúcidos não permitiram avaliar se a adição de fibras ópticas tem ou não relação direta com o comportamento das peças. Segundo os mesmos, este fato foi consequência do método de confecção do compósito (utilização de fibras aleatórias e tipo de corte adotado).

5.1.2.2 Resistência à tração na flexão

As médias dos ensaios de resistência à tração na flexão, realizados aos 28 dias, estão apresentadas na Tabela 19 e a ANOVA encontra-se na Tabela 20. No Anexo F estão descritos todos os resultados obtidos e a análise estatística completa dos dados.

Tabela 19: Resistência à tração na flexão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.

Disposição das fibras	Teor de fibras (%)	Resistência média à tração na flexão (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Ordenadas	0	1,59	0,19	12,19
	2	1,30	0,07	5,73
	3,5	1,27	0,09	7,51
	5	1,30	0,05	3,88
Aleatórias	0	1,89	0,11	6,07
	2	1,50	0,18	11,67
	3,5	1,29	0,07	5,18
	5	1,41	0,16	11,44

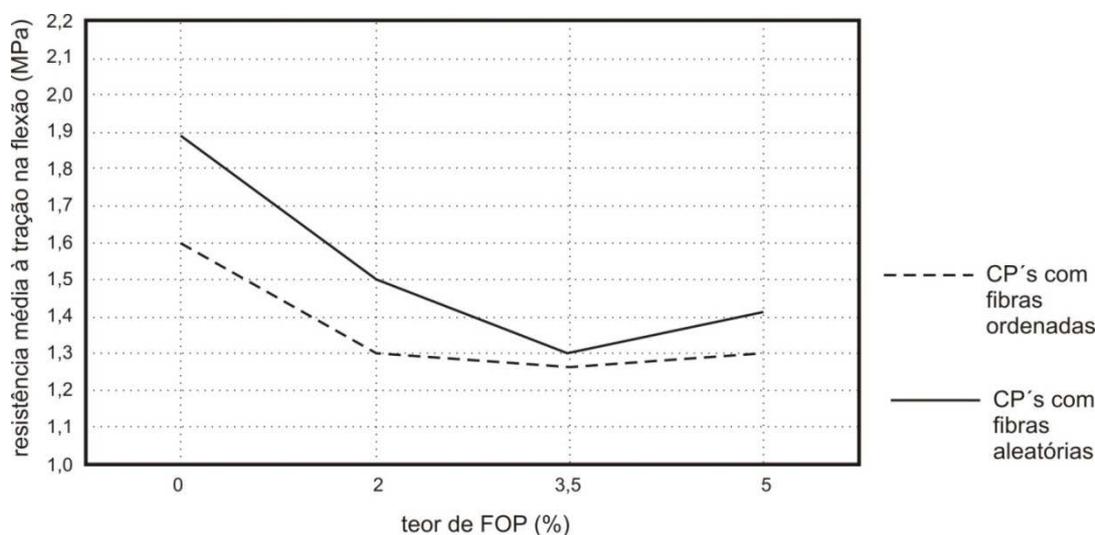
Tabela 20: ANOVA da resistência à tração na flexão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.

FONTES	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabil.	Coment.
A: Teor de fibra	1,183	3	0,394	21,42	0,00%	S
B: Disposição das fibras	0,227	1	0,227	12,35	0,15%	S
AB	0,096	3	0,032	1,74	18,18%	NS
Erro	0,515	28	0,018			
TOTAL		35				

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão nos compósitos cimentícios, como já esperado, apresentaram uma variabilidade maior do que os resultados de resistência à compressão, em parte devido à sua fragilidade para este tipo de esforço. Segundo Dumet (2008), a resistência à tração de matrizes cimentícias é relativamente baixa, ficando entre 8 a 15% da sua resistência à compressão, sendo que é muito mais difícil mensurar o valor, pois este varia muito, a depender do ensaio realizado, além das variações pelo tipo de agregado, pela resistência à compressão e pela presença de uma tensão de compressão transversal à tensão de tração.

Entretanto, ao contrário dos resultados dos ensaios de resistência à compressão, os compósitos cimentícios com fibras dispostas aleatoriamente apresentaram, em média, resistência à tração na flexão maior que os com fibras ordenadas. Na Figura 56, observa-se que este foi um comportamento apresentado para todos os teores de FOP adotados.

Figura 56: resistência média à tração na flexão dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.



Os corpos de prova com fibras aleatórias praticamente não apresentaram variação na resistência à tração quando utilizada FOP nas matrizes. Para os teores de 2%, 3,5% e 5% os CP's estatisticamente não apresentaram diferenças, podendo ser considerados da mesma família. A única exceção foi para o testemunho (0% de FOP), que apresentou uma resistência à tração estatisticamente superior aos demais teores.

Já os resultados para os CP's com fibras ordenadas apresentaram maior variabilidade. Assim como ocorrido em outros ensaios, houve uma diferença estatisticamente significativa de piora das propriedades mecânicas dos corpos de prova testemunho (0% de FOP) em relação aos demais teores de FOP adotados. Não foi possível chegar a uma conclusão em relação à comparação entre os teores 2%, 3,5% e 5% devido à variabilidade do experimento.

De acordo com Marquette e Tutikian (2011), os resultados obtidos de resistência à tração na flexão mostram que quanto maior o percentual de fibras ópticas no bloco, menor é a resistência à tração na flexão. Segundo os mesmos, em todos os ensaios dos corpos de prova com fibra óptica, os blocos romperam nas regiões onde haviam maior concentração de FOP's.

Na pesquisa desenvolvida por Uribe (2010), a adição de FOP diminuiu a resistência à tração na flexão das placas de argamassa devido ao posicionamento delas na matriz, já que a carga foi aplicada no sentido longitudinal às fibras. Entretanto, para Coelho (2010), os resultados encontrados para compósitos reforçados com fibra óptica apontaram que estas melhoraram a resistência à compressão, à flexão e torção do concreto.

5.1.2.3 Absorção de água por capilaridade

As médias dos ensaios de absorção de água por capilaridade, realizados aos 28 dias, estão apresentadas na Tabela 21 e a ANOVA encontra-se na Tabela 22. No Anexo G estão descritos todos os resultados obtidos e a análise estatística completa dos dados.

Tabela 21: Absorção de água por capilaridade dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.

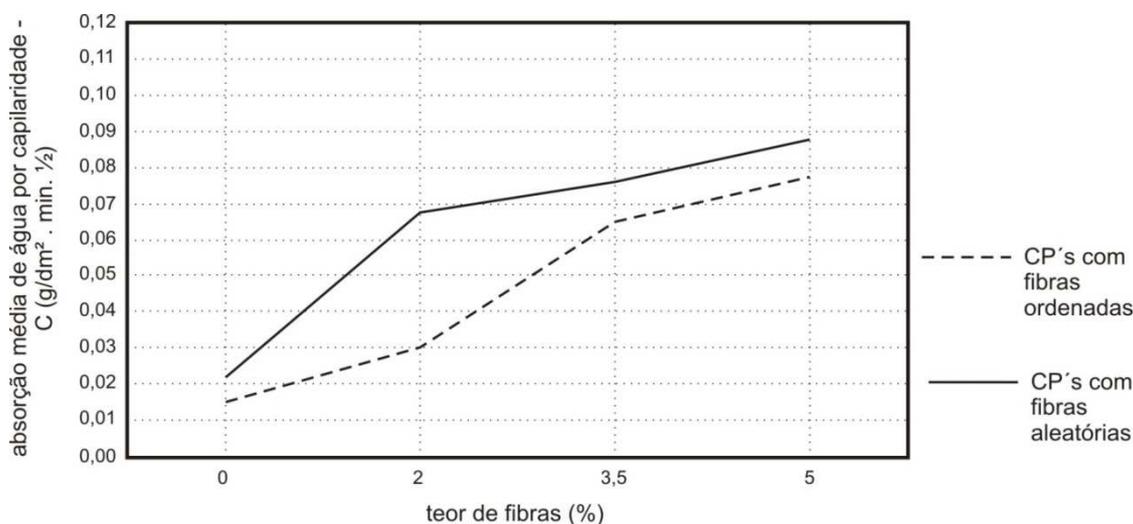
Disposição das fibras	Teor de fibras (%)	Absorção média de água por capilaridade C (g/dm ² . min. ½)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Ordenadas	0	0,015	0,005	33,33
	2	0,030	0,016	52,70
	3,5	0,065	0,011	17,20
	5	0,077	0,019	24,78
Aleatórias	0	0,022	0,016	74,69
	2	0,068	0,032	46,97
	3,5	0,076	0,039	51,47
	5	0,088	0,024	27,13

Tabela 22: ANOVA da absorção de água por capilaridade das argamassas aos 28 dias.

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabil.	Coment.
A: Teor de fibra	0,021	3	0,007	12,00	0,00%	S
B: Disposição das fibras	0,002	1	0,002	4,14	5,16%	S
AB	0,001	3	0,000	0,77	51,98%	NS
Erro	0,017	28	0,001			
TOTAL		35				

Os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade apontaram que para todos os teores de FOP, tanto nos corpos de prova executados com fibras ordenadas quanto aleatórias, houve um aumento da absorção de água conforme o aumento do teor de fibra. Além disso, os coeficientes de variação ficaram muito altos demonstrando variabilidade nos resultados dos experimentos. Na Figura 57 observa-se que há uma tendência de paralelismo (com exceção apenas para o teor 2% de ambos os métodos) entre as duas curvas, sendo que os CP's com fibras aleatórias, em todos os testes realizados, apresentaram maior absorção.

Figura 57: absorção média de água por capilaridade dos corpos de prova com e sem adição de fibras aos 28 dias.

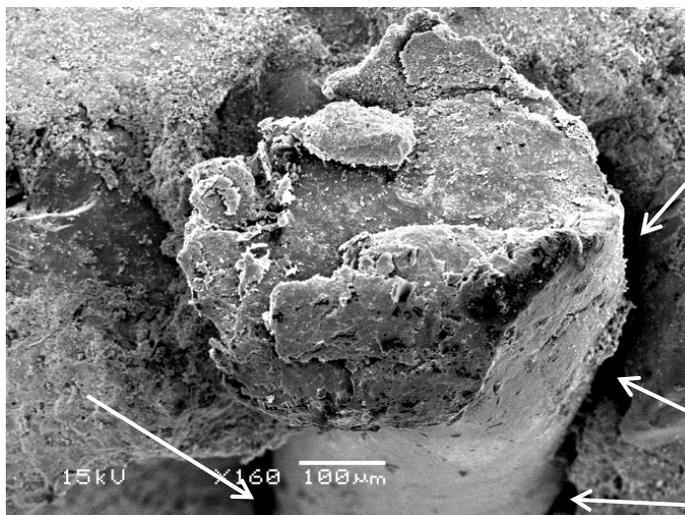


Uma das principais razões encontradas, tanto para o aumento de absorção de água por capilaridade, quanto para a diminuição das propriedades mecânicas dos compósitos à medida que se aumenta o teor de FOP, é a interação fibra-matriz.

5.1.2.4 Interação fibra-matriz

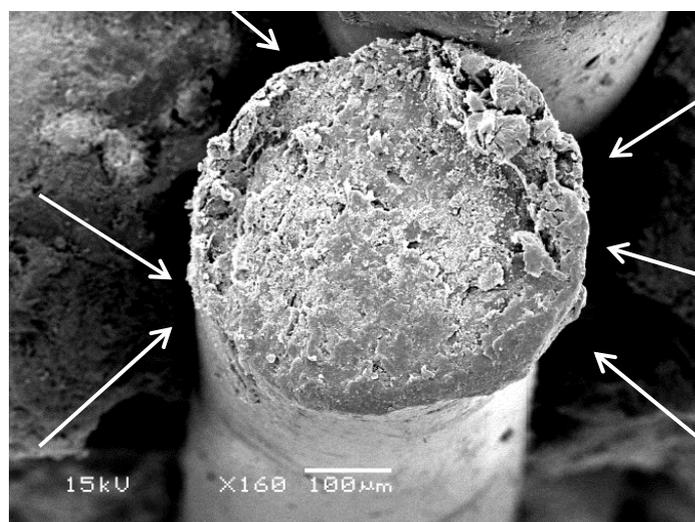
Existem fortes indícios que entre os principais motivos da diminuição de resistência e aumento da absorção de água com o incremento de teor de FOP nos CP's de argamassa está a interface fibra/matriz. Por tratar-se de um material extremamente liso, praticamente impermeável e escorregadio, esta interação ficou prejudicada. Segundo Uribe (2010), em ensaio de absorção de água nas FOP feito em 30 amostras, foi possível verificar que após 800 horas de imersão em água deionizada, a massa aumentou em média 0,05%, levando a concluir que as FOP's não absorveram água. Através do auxílio da microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários verificou-se a presença de vazios na interface fibra-argamassa (Figura 58), prejudicando uma melhor aderência e conseqüentemente minorando a resistência à compressão do material em relação a teores menores de fibra e ao testemunho com 0% de FOP.

Figura 58: MEV por elétrons secundários da interface fibra/matriz com a indicação de vazios existentes. Magnificação: 160 vezes.



Também através das análises feitas no MEV, podem-se tirar alguns possíveis motivos para a diferença de comportamento de resistência à compressão entre os corpos de prova com o mesmo teor de FOP, entretanto executados a partir de métodos diferentes. Na Figura 59, observa-se uma amostra de um compósito com FOP's dispostas aleatoriamente, nela verifica-se que além dos vazios já observados como característicos ao longo das fibras, também há o acréscimo de vazios entre as fibras, o que conseqüentemente gera um maior decréscimo de resistência à compressão e maior aumento da absorção de água por capilaridade dos compósitos com fibras aleatórias em relação aos com fibras ordenadas, para um mesmo teor de FOP. Como no método com FOP's dispostas regularmente esses vazios entre fibras aglutinadas não existe, pois há uma distância mínima controlada entre elas, existe a tendência de não haver diferenças muito grandes entre os CP's com o mesmo teor de FOP. Já no método aleatório a diferença de resistência à compressão entre o testemunho com 0% de FOP e os teores menores tende a ser mais perceptível, pois não há um controle para evitar aglutinação de fibras e conseqüentemente uma maior quantidade de vazios entre elas além dos vazios presentes na interface fibra/matriz.

Figura 59: MEV por elétrons secundários da aglutinação de fibras com indicação de presença de vazios na interface fibra/matriz. Magnificação: 160 vezes.



5.1.2.5 Transmitância de luz

As médias dos ensaios de transmitância de luz, no estado endurecido dos corpos de prova, estão apresentadas na Tabela 23 e a ANOVA encontra-se na Tabela 24. No Anexo H estão descritos todos os resultados obtidos e a análise estatística completa dos dados.

Tabela 23: Transmitância média de luz dos corpos de prova com e sem adição de fibras no estado endurecido.

Disposição das fibras	Teor de fibras (%)	Transmitância média de luz (lux)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Ordenadas	0	0	-	-
	2	7,67	0,58	7,53
	3,5	11,33	0,58	5,09
	5	25,00	1,00	4,00
Aleatórias	0	0	-	-
	2	7,67	0,58	7,53
	3,5	11,67	0,58	4,95
	5	23,33	1,15	4,95

Tabela 24: ANOVA da transmitância de luz dos corpos de prova com e sem adição de fibras.

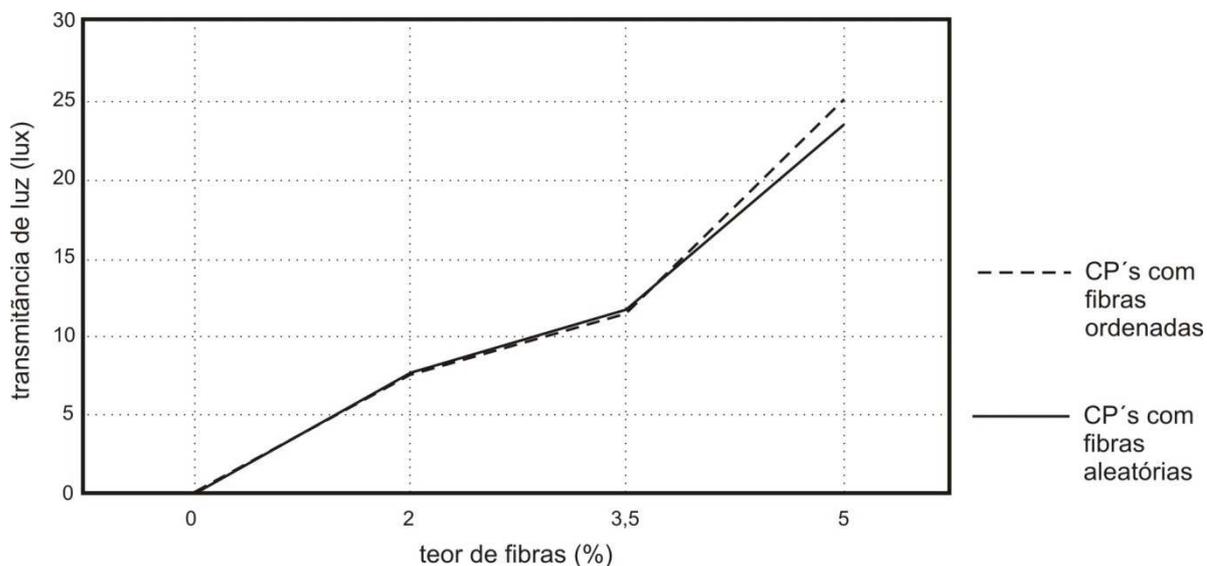
FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabil.	Coment.
A: Teor de fibra	1833,667	3	611,222	1333,58	0,00%	S
B: Disposição das fibras	0,667	1	0,667	1,45	24,53%	NS
AB	3,667	3	1,222	2,67	8,29%	NS
Erro	7,333	16	0,458			
TOTAL		23				

Os dados obtidos de transmitância de luz para o teor de 0% de fibras pertenceram aos corpos de prova moldados sem a adição de FOP. Neste teor foi testada a eficiência de vedação do aparato desenvolvido na pesquisa (Figura 53). Como os resultados para este teor apontaram 0lux de transmitância, obteve-se a confirmação da sua precisão de vedação. Entre os teores de 2% e 3,5% de FOP, o ganho de transmitância de luz foi proporcionalmente igual ao incremento de fibras, ou seja, a diferença de 50% a mais de fibras foi o mesmo ganho em relação à transmitância de luz.

Já a diferença entre o número de fibras do teor de 3,5% para o de 5%, que significou um aumento de aproximadamente 40% na quantidade, a transmitância de luz dobrou. Ou seja, foram acrescentadas 40% a mais de fibras e obteve-se um ganho de 100% na transmitância de luz. Em termos de custos de produção do material este dado é muito importante, pois é possível obter um compósito com uma translucidez significativamente melhor com um pequeno aumento no teor de FOP.

Entre os métodos de execução dos compósitos com fibras aleatórias e com fibras ordenadas não foi constatada diferença significativa de transmitância de luz para um mesmo teor de FOP. Como complemento, na Figura 60 pode-se observar o gráfico dos resultados de transmitância de luz para os 4 teores de FOP adotados.

Figura 60: Transmitância de luz dos corpos de prova com e sem adição de fibras.



5.1.2.6 Módulo de elasticidade dinâmico

As médias dos ensaios do módulo dinâmico de elasticidade, realizados aos 28 dias, estão apresentadas na Tabela 25. No Anexo L estão descritos todos os resultados obtidos e a análise estatística completa dos dados.

Tabela 25: Módulo dinâmico de elasticidade médio dos corpos de prova com e sem adição de fibras no estado endurecido.

Disposição das fibras	Teor de fibras (%)	Módulo Dinâmico de Elasticidade médio E (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
Ordenadas	0	41,42	0,071	0,17
	2	38,52	1,005	2,61
	3,5	38,66	0,885	2,29
	5	38,84	1,141	2,94
Aleatórias	0	44,32	0,887	2,00
	2	39,84	0,238	0,60
	3,5	39,68	1,284	3,22
	5	36,57	0,664	1,80

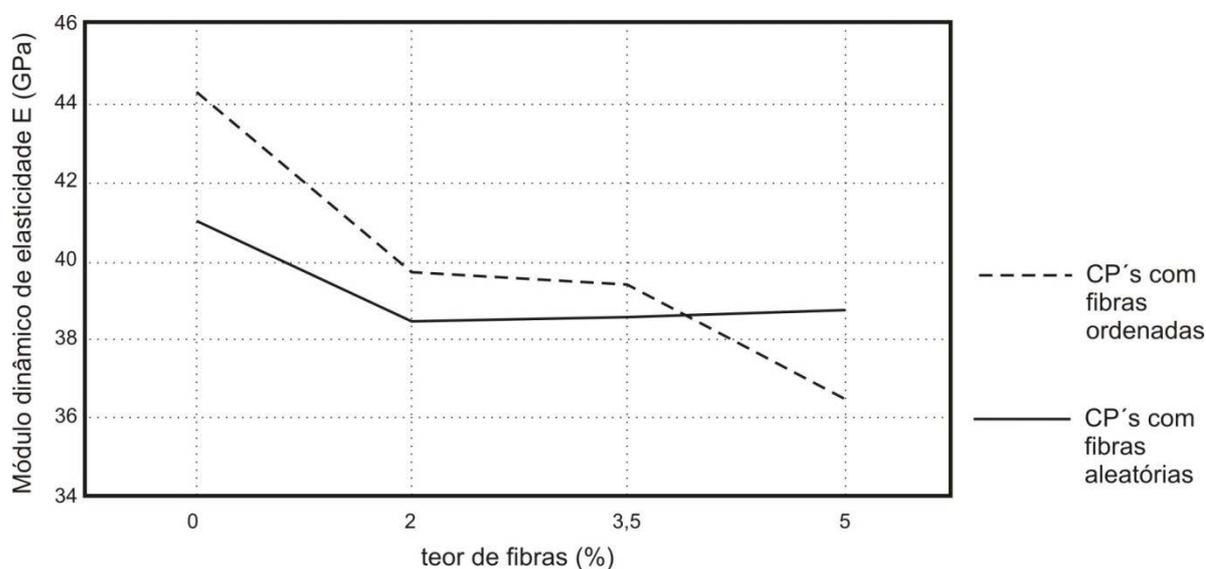
Tabela 26: ANOVA do módulo dinâmico de elasticidade dos corpos de prova com e sem adição de fibras.

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabil.	Coment.
A: Teor de fibra	138,001	3	46,000	61,25	0,00%	S
B: Disposição das fibras	6,091	1	6,091	8,11	0,82%	S
AB	28,370	3	9,457	12,59	0,00%	S
Erro	21,029	28	0,751			
TOTAL		35				

Através da análise estatística, Anexo L, para os CP's com fibras ordenadas não houve diferença estatisticamente significativa entre todos os teores com adição de fibra. Assim, do ponto de vista estatístico do módulo de elasticidade dinâmico os corpos de prova com teores de 2%, 3,5% e 5% de fibras ordenadas podem ser considerados como da mesma família. Para os blocos com 0% de FOP tanto executados tanto no método aleatório quanto o ordenado apresentaram diferença significativa em relação às peças com adição de fibra.

Para os CP's executados no método aleatório foram considerados da mesma família apenas os teores de 2% e 3,5%. O teor de 5%, do ponto de vista estatístico mostrou-se diferente em relação aos outros. Acredita-se que por se tratar do maior teor de fibra e no método aleatório, onde não há um controle sobre os espaçamentos entre os fios, os acúmulos de fibras em certos pontos do bloco podem ter contribuído para o menor módulo de elasticidade dinâmico. Como complemento, na Figura 61 pode-se observar o gráfico dos resultados do módulo dinâmico de elasticidade para os 4 teores de FOP adotados.

Figura 61: Módulo de elasticidade dos corpos de prova com e sem adição de fibras



Independente do uso de fibras ópticas nos blocos de argamassas, acredita-se que o traço rico em materiais finos, tanto em relação ao cimento quanto à utilização de uma areia fina, foi o principal motivo para as argamassas apresentarem um módulo de elasticidade elevado e conseqüentemente maior rigidez. Quanto maior for o módulo de elasticidade de um material, mais rígido será este, deformando-se menos sob ação de um determinado carregamento em relação a um material com módulo de elasticidade menor.

5.1.2.7 Síntese da caracterização dos blocos no estado endurecido

A fim de sintetizar as propriedades características apresentadas pelos blocos com as diferentes variáveis de método de execução e teor de FOP's foram elaboradas a Tabela 27 (valores encontrados através dos ensaios) e a Tabela 28 (análises estatísticas de significância destes dados).

Tabela 27: Síntese dos principais comportamentos dos corpos de prova com e sem adição de fibras

Disposição das fibras	Teor de fibras (%)	F _{cm} (Mpa)	F _{t flexão} (Mpa)	absorção de água por capilaridade C (g/dm ² . min. ½)	Transmitância de luz (lux)	Variação (%)				
						F _c	F _t	absorção	lux	Lux/MPa
Ordenadas	0	56,81	1,59	0,015	0	-	-	-	-	-
	2	57,06	1,30	0,030	7,67	0,44	-18,24	100,00	767	0,13
	3,5	53,99	1,27	0,065	11,33	-4,96	-20,13	333,33	1133	0,20
	5	50,64	1,30	0,077	25,0	-10,86	-18,24	413,33	2500	0,49
Aleatórias	0	59,90	1,89	0,022	0	-	-	-	-	-
	2	53,06	1,50	0,068	7,67	-11,42	-20,64	209,09	767	0,14
	3,5	50,96	1,29	0,076	11,67	-14,92	-31,75	245,45	1167	0,23
	5	47,99	1,41	0,088	23,33	-19,88	-25,40	300,00	2333	0,49

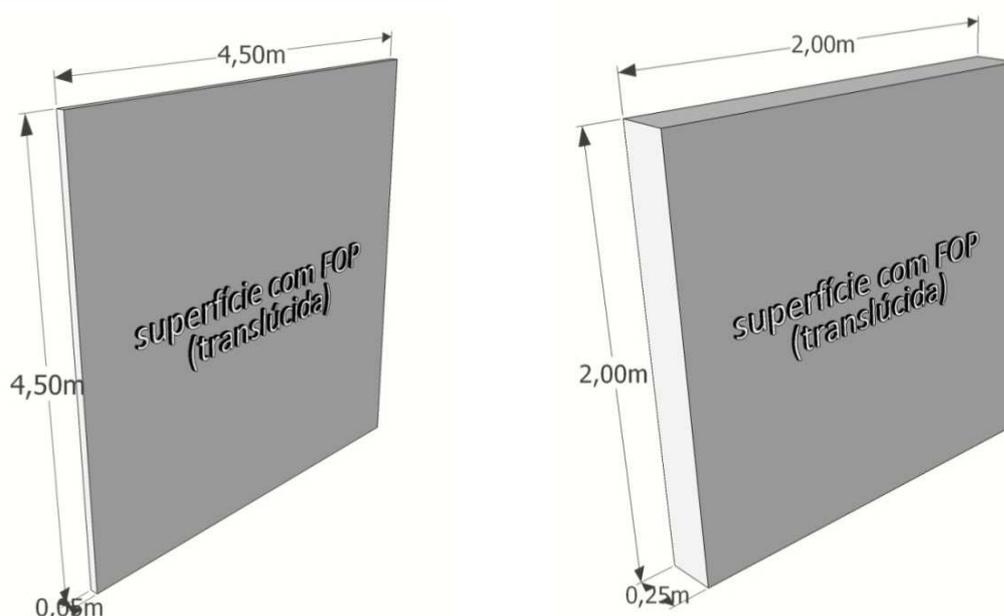
Tabela 28: Síntese da significância estatística das variáveis e suas interações

Variável	Fc	Ft	Absorção	lux
A: Teor de fibras	S	S	S	S
B: Disposição das fibras	S	S	S	NS
AB	S	NS	NS	NS

5.2 Cálculo dos custos aproximados dos blocos translúcidos

O cálculo dos custos aproximados dos blocos translúcido foi elaborado a fim de se obter uma estimativa do material produzido nesta pesquisa. Em relação ao método de cálculo utilizado para os diferentes teores de FOP, a porcentagem de fibra é dada em relação à área da superfície translúcida. Entretanto, foi levantado o questionamento sobre as dimensões desses blocos e suas respectivas influências sobre o cálculo do consumo de fibra por m³ de argamassa translúcida para um mesmo teor de FOP adotado. Na Figura 62 estão ilustrados dois blocos translúcidos, ambos com 1m³ de volume, mas com dimensões diferentes simulando uma placa translúcida (5cm de espessura) e uma parede translúcida (25cm de espessura).

Figura 62: metro cúbico da argamassa translúcida: (a) bloco 4,5 x 4,5 x 0,05m; (b) bloco 2,0 x 2,0 x 0,25m.



Como se pode observar na Tabela 29, a diferença entre o comprimento total da FOP utilizada para blocos translúcidos foi de apenas 1,23%, podendo ser considerada como não significativa. Portanto, o cálculo do custo do concreto translúcido através do seu volume (m^3) pode ser considerado como satisfatório independentemente da dimensão da superfície translúcida.

Tabela 29: quantitativo das FOP's utilizadas nos dois blocos translúcidos de $1m^3$.

Parâmetro utilizado	Bloco A (4,5 x 4,5 x 0,05m)	Bloco B (2 x 2 x 0,25m)
Área da superfície translúcida	20,25m ²	4m ²
Área necessária para teor de 5% de FOP	1,025m ²	0,2m ²
Nº de fios necessários	8.061.306	1.592.327
Comprimento total dos fios necessários	403.065m	398.090m

A caracterização das propriedades físicas das FOP's utilizadas nos blocos pode ser encontrada na Tabela 30. Através destas informações foram estabelecidos os quantitativos de consumo de fibra para cada um dos teores utilizados nas superfícies das peças translúcidas.

Tabela 30: caracterização física da fibra ótica polimérica utilizada.

Parâmetro do fio óptico	milímetro (mm)	metro (m)
Diâmetro	Ø 0,4mm	Ø 4×10^{-4} m
Área da superfície de topo	0,1256mm ²	$1,256 \times 10^{-7}$ m ²

Através das análises dos dados citados neste capítulo prosseguiram-se para os cálculos comparativos aproximados do custo das placas translúcidas por m^3 com os diferentes teores de FOP utilizados, conforme pode ser observado na Tabela 31. Os dados completos podem ser encontrados no Anexo K.

Tabela 31: custos dos blocos translúcidos

Disposição das fibras nos Cp's	Teor de fibras	Custo TOTAL aproximado do m ³	Resistência média obtida aos 28 dias (MPa)	R\$/MPa	Transmitância média de luz obtida (lux)	R\$/Lux
Ordenadas	0%	R\$ 490,49	56,81	R\$ 8,63	0	R\$ 0,00
	2%	R\$ 6.063,75	57,06	R\$ 106,27	7,67	R\$ 790,58
	3,5%	R\$ 10.173,66	53,99	R\$ 188,43	11,33	R\$ 897,94
	5%	R\$ 14.423,64	50,64	R\$ 284,82	25,00	R\$ 576,94
Aleatórias	0%	R\$ 490,49	59,90	R\$ 8,18	0	R\$ 0,00
	2%	R\$ 6.063,75	53,06	R\$ 114,28	7,67	R\$ 790,58
	3,5%	R\$ 10.173,66	50,96	R\$ 199,64	11,67	R\$ 871,77
	5%	R\$ 14.423,64	47,99	R\$ 300,55	23,33	R\$ 618,24

Analisando os valores dos custos para o m³ do concreto translúcido podem ser feitos alguns comparativos dos blocos com adição de FOP's em relação ao mesmo bloco, com a mesma dosagem de componentes (cimento, areia fina, sílica ativa e aditivo superplastificante policarboxílico), entretanto, sem o uso de fibras. Não foram considerados os custos das fôrmas e mão de obra.

Em relação ao testemunho (0% de FOP), o bloco com adição de 2% de fibra teve um aumento de custo em torno de 12 vezes. Já a peça com o teor de 3,5% elevou, em média, 21 vezes o seu custo. Para placas com 5% de fibra óptica polimérica o aumento foi de aproximadamente 29 vezes.

Como o concreto translúcido tem como principal requisito a sua capacidade de translucidez e também precisa apresentar uma capacidade de resistência mecânica com níveis satisfatórios, a relação custo/transmitância de luz (R\$/Lux) foi considerada como um bom parâmetro de avaliação. Assim sendo, apesar do material com 5% de FOP apresentar o maior custo global, quando é considerada a relação R\$/Lux, este foi o que apresentou o melhor custo benefício.

6 CONCLUSÕES

A fibra óptica (FOP) é um material que foi desenvolvido principalmente para o setor de transmissão de dados, sendo posteriormente adotada também para a transmissão de luz (no caso, fibras plásticas). A adição de fibra em compósitos cimentícios tem como principal objetivo a transmitância de luz, ampliando dessa forma as possibilidades de utilização destes materiais na construção civil. Assim sendo, foram estudadas as influências da adição destas fibras a fim de saber se elas tornam o material pior, indiferente ou melhor (neste caso funcionando como um reforço) que o testemunho com 0% de FOP.

Nos compósitos fibrosos, em geral, a resistência à compressão é pouco afetada pela presença de fibras. Estas, comumente, atuam de forma mais significativa quando as matrizes são submetidas a esforços de tração. Pode-se dizer que uma das principais contribuições das fibras está no significativo aumento da ductilidade no estágio de pós-fissuração do compósito, ou seja, no incremento da capacidade de absorção de energia do material.

Para os esforços de resistência à compressão, os corpos de prova apresentaram piora significativa das suas propriedades. Nestes ensaios foi possível identificar que quanto maior foi o teor de FOP adotado, mais perda de resistência à compressão o compósito apresentou.

Nos ensaios de resistência à tração na flexão houve piora significativa das propriedades mecânicas dos compósitos. Entretanto, não foi possível identificar uma perda progressiva de resistência à tração conforme o maior aumento de teor de FOP adotado. Devido ao sentido em que as fibras foram organizadas nos compósitos, paralelamente à carga de tração, estas não atuaram de forma a representar um reforço estrutural.

Nos testes de absorção de água por capilaridade, houve aumento de absorção conforme o maior teor de FOP adotado. Este fenômeno, juntamente com a piora das propriedades de resistência à compressão e tração, pode ser explicado pela zona de transição fibra-matriz. Como as fibras ópticas poliméricas são extremamente lisas e não apresentam absorção de água, através de análises feitas no MEV, foi possível identificar muitos vazios nesta zona de transição, tornando o material mais poroso e frágil.

Com relação à transmitância de luz, através do uso de um luxímetro e a construção de um aparato para executar a medição, foram realizados os ensaios com métodos adaptados para esta pesquisa. Entre os teores de 2% e 3,5% houve um acréscimo de transmitância de luz proporcional ao incremento de fibras utilizadas. Entretanto, entre os teores de 3,5% e 5% houve o dobro de aumento de transmitância de luz em relação ao mesmo aumento do número de fibras. Este é um forte indício que, em termos de custos, é muito mais vantajoso fabricar uma peça translúcida com 5% de teor de FOP, que transmite o dobro de luminosidade, que uma peça com 3,5%.

Com relação aos dois diferentes métodos de execução adotados (fibras ordenadas e fibras aleatórias), inicialmente era esperado que as propriedades mecânicas dos compósitos fossem diferentes devido ao extremo cuidado de execução das placas com fibras dispostas ordenadamente. Todo este cuidado na execução visou eliminar ao máximo os possíveis ruídos experimentais. Entretanto, para a resistência à compressão (considerado como o principal método de caracterização mecânica do material), após os diversos ensaios realizados, verificou-se que os compósitos confeccionados nos dois métodos foram considerados estatisticamente da mesma família

Em geral, pode-se concluir que a adição de FOP nos compósitos cimentícios teve como consequência a piora das suas propriedades mecânicas. Entretanto, esta perda, apesar de ser significativa, não torna o compósito um material impróprio para o uso na construção civil. Mesmo com a adição de 5% de FOP, os corpos de prova ainda continuaram apresentando um comportamento satisfatório (em termos de resistência à compressão e para a tração na flexão) para a sua utilização. A fibra óptica polimérica, apesar de não ser um material destinado especificamente para a construção civil, pode ser adaptada para a confecção de blocos de argamassa translúcida sem grandes prejuízos às propriedades da matriz cimentícia.

6.1 Sugestões para futuros trabalhos

A pesquisa desenvolvida procurou analisar a influência da adição de fibra óptica polimérica em blocos de argamassa. Entretanto, durante a realização dos diversos experimentos surgiram algumas perguntas que podem servir de orientação para futuros trabalhos:

- Estudo da influência da FOP para teores acima de 5%;

- Análise quantitativa da diferença de transmitância luminosa provocada pelo corte com estilete, tesoura e serra nas FOP's;
- Estudo da aderência da FOP na matriz cimentícia e sua consequente resistência ao arrancamento;
- Avaliação dos vazios (porosidade) presentes na interface fibra/matriz;
- Desenvolvimento de um método mais prático e eficiente de ordenar as fibras nos blocos de argamassa;
- Aplicação e estudo da influência de fibras ópticas de vidro (que poderiam ser obtidas dos resíduos gerados pela indústria da comunicação e transmissão de dados) em blocos de argamassa;
- Montagem de um protótipo, em escala reduzida, de um ambiente com paredes translúcidas para verificar a possível economia de energia de iluminação que poderia ser obtida através da luz solar.

REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1991.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE. **ACI 544.1R-96: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete**. Detroit: ACI. 1996.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE. **ACI 544.2R-89: Measurement of properties of fiber reinforced concrete**. Detroit: ACI. 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3822**: Standard test method for tensile properties of single textile fibers. West Conshohocken, Pennsylvania State. 2007.
- ARNOLD, D. C. M.; KAZMIERCZAC, C. S. **Influência da distribuição granulométrica do agregado miúdo e do teor de fíler nas propriedades de argamassas com areia de britagem**. VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas - SBTA. Curitiba. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30**: Agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro. 2001.
- _____. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006.
- _____. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro. 2003.
- _____. **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 7200**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento. Rio de Janeiro. 1998.
- _____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2005.
- _____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro. 2003.

_____. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto - especificações. Rio de Janeiro. 2007.

_____. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro. 2005.

BARTOLI, J. R.; COSTA, R. A.; VERDONCK, P.; MANSANO, R. D.; CARREÑO, M. N. **Filmes ópticos poliméricos fluorados com índice de refração gradual**. Polímeros: Ciência e Tecnologia. Artigo Técnico Científico (disponível em www.scielo.br/pdf/po/v9n4/6197.pdf acessado em 03/03/2013). São Paulo. 1999.

BASSI, M. R. **Estudo de fibra alternativa de escória de alto-forno como reforço em matrizes cimentícias**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2010.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.

BECKER, C., CAIO, F., LUDWIG, D., SCHERER, E., MARQUETTO, L., RAHMEIER, R., TUTIKIAN, B.F. **Execução de paredes de vedação com concreto translúcido**. 52º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON. Fortaleza. 2010.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2003.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering – Na Introduction**. Wiley. Estados Unidos. 2004.

CARASEK, H. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. In ISAIA, G. C. (Editor). Cap. 26. Volume 1. 2ª Edição. São Paulo. 2010.

CASSAR, L.; PEPE, C.; TOGNON, G.; GUERRINI, G.; AMADELLI, R., **White cement for architectural concrete, possessing photocatalytic properties**. 11th International Congress on the Chemistry of Cement. Durban. Africa do Sul. 2003.

CHEN, C. L. – **Elements of optoelectronics and fiber optics**. School of Electrical and Computer Engineering. Purdue University. Indiana. USA. 1996.

COELHO, F. C. A.. **Desenvolvimento e Aplicação do Concreto Translúcido**. 52º Congresso Brasileiro do Concreto. Fortaleza. IBRACON, 2010.

DONATO, M. **Comportamento mecânico do concreto compactado com rolo reforçado com fibras de polipropileno**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2003.

DUMET, T. B. **Estruturas de concreto armado**. Notas de aula. Escola Politécnica. Departamento de construção e estruturas. Universidade Federal da Bahia. (disponível em <http://pt.scribd.com/doc/5099704/16/Resistencia-a-tracao>, acessado em 02/05/2013). Salvador. 2008.

FÉLIX, A. H. O. **Compósitos de polipropileno com fibra de vidro utilizando viniltrióxido-silano como agente de adesão**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2002.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. EPUSP. 2000.

FIGUEIREDO, A. D. “Concretos com fibras”, In: ISAIA, G. C. (Editor) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Cap. 37. IBRACON. São Paulo. 2011.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2002.

GARCEZ, E. O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005.

GOMES, C. E. M. **Propriedades da pasta de cimento Portland com adições do copolímero Va/VeoVa e fibras de poliamida – estudo da interface fibra-matriz**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais. Instituto de Física de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2005.

GUANG, Y., HUANG, H., **Self-healing in cement-based materials by liquid capsules: mechanism and application**. (Artigo digital disponível em <http://selfhealingconcrete.blogspot.com.br/p/encapsulated-cement.html> acessado em 19/12/2012). Civil Engineering and Geosciences Materials & Environment . Delft University of Technology. Delft. Holland. 2010.

HULL, D. **An introduction to composite materials**. Cambridge University. United Kingdom. 1995.

JOHN, V. M. **Reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil**. ANTAC. São Paulo. 1997.

JONKERS, H., WIKTOR, V., BELTRAN, L. S., MORS, R. **Self-healing bacteria-based concrete: from lab table to outdoor application**. (Artigo digital disponível em <http://selfhealingconcrete.blogspot.com.br/p/bacterial-concrete.html> acessado em 19/12/2012). Civil Engineering and Geosciences Materials & Environment . Delft University of Technolog. Delft. Holanda. 2010.

KERN, A. P. **Estudo da viabilidade da incorporação de resíduos de contrafortes de calçados em matriz de gesso para uso como material de construção civil**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1999.

KIRCHHEIM, A. P. **Aluminatos tricálcico cúbico e ortorrômbico: análise da hidratação *insitu* e produtos formados**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008.

KOENDERS, E., SISOMPHON, K., COPUROGLU, O., **Encapsulated SH Materials**. (Artigo digital disponível em <http://selfhealingconcrete.blogspot.com.br/p/encapsulated-cement.html> acessado em 18/12/2012). Civil Engineering and Geosciences Materials & Environment . Delft University of Technolog. Delft. Holanda. 2010.

LAMEIRAS, R. M. **Contribuição ao estudo das propriedades dos materiais cimentícios reforçados com fibras de vidro (*glass fibre reinforced cement – GRC*)**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2007.

LITRACON – light transmitting concrete (Disponível em: www.litracon.hu acessos em 2012).

MALSIKA, A. M. **Microscopia eletrônica de varredura e microanálise**. (Apostila eletrônica para divulgação disponível em: http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV_index.htm, acessado em 16/02/2013). Laboratório de caracterização microestrutural e análise de imagens. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. 2007.

MARQUETTO, L.; TUTIKIAN, B. F. **Desenvolvimento e análise de blocos translúcidos para utilização na construção civil**. Artigo eletrônico para divulgação, UNISINOS. 2011.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª ed. São Paulo. Pini. 2008.

MONROY, T.; BOOM, vd H.P.A.; KOONEN, A.M.J.; KHOE, G.D.; WATANABE, Y.; KOIKE, Y.; ISHIGURE, T. **Data transmission over polymer optical fibers - Optical Fiber Technology: materials, devices and systems**. Elsevier. 2003.

NUNES, L. N.; AGOPYAN, V. **A influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço**. Boletim técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1998.

ODIAN, G. **Principles of polymerization**. College of Staten Island. City University of New York. New York. 4º Ed. 2004.

PEREIRA, C. H. A. F. **Avaliação da influência da adição de fibras sintéticas na durabilidade do concreto de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás. 2002.

PERUZZI, A. P. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2002.

POLISHUK, P. **Plastic optical fibers branch out**. Plastic Optical Fiber Trade Organization. 2006. (Arquivo disponível em <http://www.pofto.com/downloads/ieee/pof.branches.v6.pdf>, acessado em 10/03/2012).

PURNELL, P.; SHORT, N. R.; PAGE, C. L.; MAJUNDAR, A. J. **Microestrutural observations in new matrix glass fiber reinforced cement**. Cement and concrete research. School of engineering and Applied Science. Aston University. Birmingham. United Kingdom. 2000.

RAMAKRISHNAN, V.; PANCHALAN, R. K.; BANG, S.S. **Improvement of concrete durability by bacterial mineral precipitation**. 11th International Conference on Fracture, Turin, Itália. 2005. (Artigo também disponível em formato digital em www.icf11.com/proceeding/extended/4843.pdf acessado em 19/11/2012).

RAMESH, S.; LEEN, K. H.; KUMUTHA, K.; AROF, A. K.. **FTIR studies of PVC/PMMA blend based polymer electrolytes**. Elsevier – Spectrochimica Acta Part A 66. 2007.

RECENA, F. A. P. **Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2011.

REPETTE, W. L. “Concretos de Última Geração: presente e Futuro”, In ISAIA, G. C. (Editor) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Cap. 49. IBRACON. São Paulo. 2005.

REPETTE, W. L. “Concretos de última geração e para fins especiais”, In: ISAIA, G. C. (Editor) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Cap. 49. IBRACON. São Paulo. 2011.

SANTOS, L. A. **Desenvolvimento de cimento de fosfato de cálcio reforçado por fibras para uso na área médico-odontológica.** Tese de Doutorado. Departamento de engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002.

SAVASTANO Jr., H. **Zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1992.

SCHLANGEN, E.; KIM, J. **Fibre cement-based composites.** (Artigo digital disponível em <http://selfhealingconcrete.blogspot.com.br/p/fibre-cementitious-composites.html> acessado em 19/12/2012). Civil Engineering and Geosciences Materials & Environment . Delft University of Technolog. Delft. Holanda. 2011.

SILVA, G. S. M. S. **Durabilidade e absorção por capilaridade em betão.** Dissertação de Mestrado (especialização em materiais e processos de construção). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. 2010.

SILVA, A. S. R. (2008). **Argamassas: conceitos, tipos e funções.** Salvador. 2008. (disponível em <http://www.scribd.com/doc/24767831/Argamassa-Conceito-Funcao-e-Tipos>, acesso em 26 de março de 2013).

TANESI, J. **A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1999.

TUAN, C. Y. **Concrete Technology Today: conductive concrete for bridge deck deicing.** 2009. (Artigo digital disponível em http://www.cement.org/tech/cct_con_design_conductive.asp acessado em 08/11/2012)

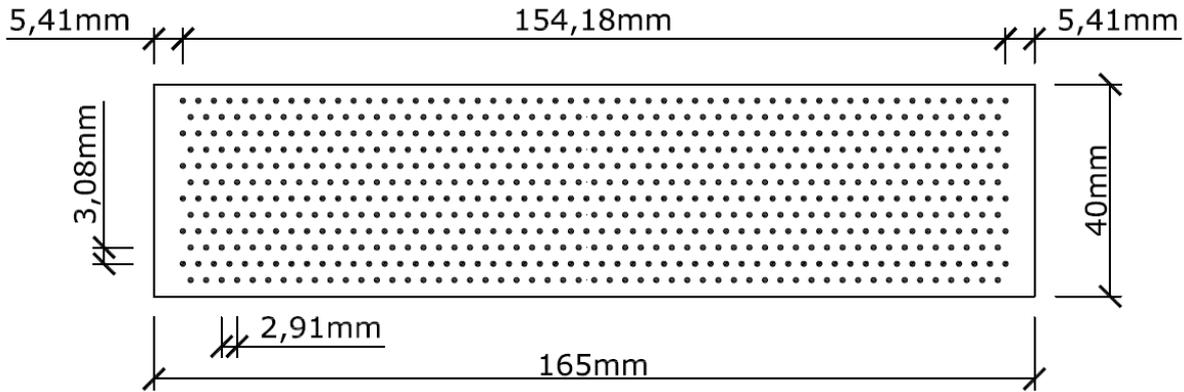
TUTIKIAN, B. F. **Concreto translúcido pode ir além da estética.** 2009. (Artigo digital disponível em <http://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/concreto-translucido-pode-ir-alem-da-estetica/> acessado em 30/03/2012)

URIBE, L. J. M. **Desenvolvimento a avaliação de argamassa translúcida com fibra ótica polimérica.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. 2010.

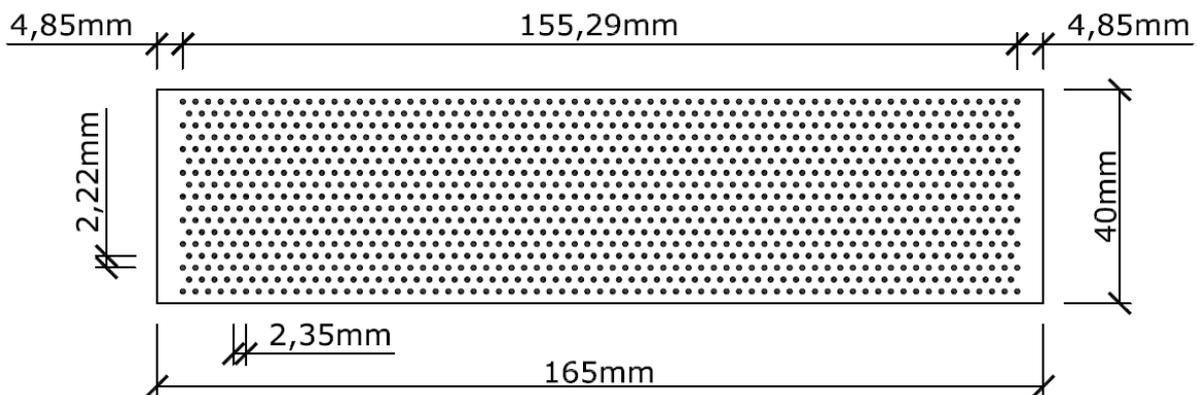
ZUBIA, J.; ARRUE, J. **Plastic optical fibers: an introduction to their technological processes and applications.** Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones. School of Telecommunications Engineering. ETSI de Bilbao. Universidad del País Vasco. Bilbao. Spain. 2001.

ANEXO A – Projeto das placas de acrílico perfuradas e resultado dos moldes

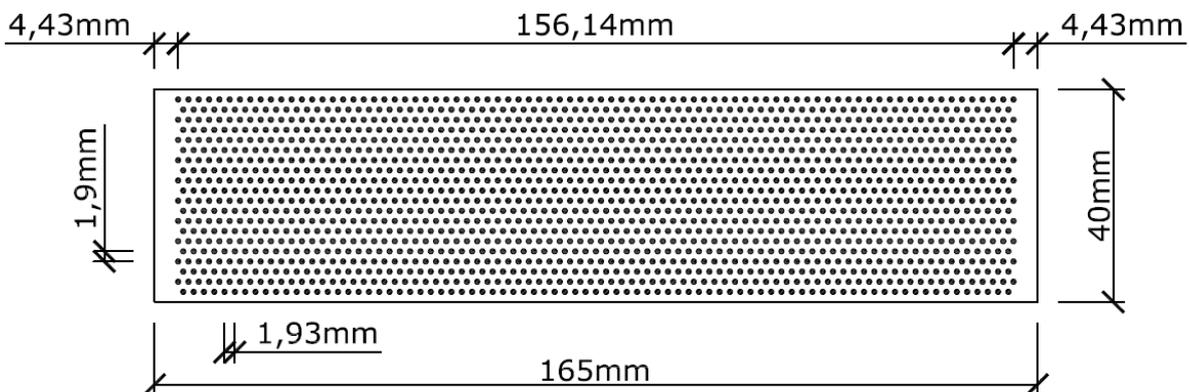
Vista frontal do projeto da placa de acrílico – teor de 2% de FOP



Vista frontal do projeto da placa de acrílico – teor de 3,5% de FOP



Vista frontal do projeto da placa de acrílico – teor de 5% de FOP



Vista frontal do CP prismático (4x4x16cm) – teor de 2% de FOP ordenadas.



Vista frontal do CP prismático (4x4x16cm) – teor de 3,5% de FOP ordenadas.



Vista frontal do CP prismático (4x4x16cm) – teor de 5% de FOP ordenadas.



Vista frontal do CP prismático (4x4x16cm) – teor de 2% de FOP aleatórias



Vista frontal do CP prismático (4x4x16cm) – teor de 3,5% de FOP aleatórias



Vista frontal do CP prismático (4x4x16cm) – teor de 5% de FOP aleatórias



ANEXO B – Dimensões dos corpos de prova e módulo dinâmico de elasticidade

Dimensões dos corpos de prova e módulo dinâmico de elasticidade – CP`s com fibras ordenadas

Teor de fibras ordenadas	Nº da amostra	Comprimento 01 (mm)	Comprimento 02 (mm)	Altura 01 (mm)	Altura 02 (mm)	Largura 01 (mm)	Largura 02 (mm)	Massa (gr)	Módulo Dinâmico de Elasticidade (GPa)
0%	1	159,92	160,02	40,21	39,98	40,10	40,14	597,8	41,51
	2	160,04	160,12	40,61	39,93	40,22	40,03	601,1	41,35
	3	159,67	159,05	40,15	40,17	40,52	40,01	601,2	41,37
	4	159,87	159,95	39,78	39,77	40,23	40,10	589,3	41,42
2%	1	160,03	160,12	40,10	40,49	40,26	39,95	598,7	39,41
	2	160,24	160,40	40,53	40,85	40,65	40,47	583,5	38,29
	3	159,74	159,80	40,03	40,25	40,42	40,22	577,7	39,17
	4	159,47	159,24	40,00	39,39	40,58	40,67	575,6	37,19
3,5%	1	159,94	159,68	39,77	39,11	40,52	40,51	576,5	39,16
	2	159,53	159,48	40,37	40,17	40,70	40,44	563,9	37,81
	3	159,17	159,27	40,46	40,38	40,72	40,45	578,5	39,65
	4	159,61	159,75	40,77	40,15	40,33	40,30	565,7	38,03
5%	1	160,26	160,17	40,28	40,64	40,54	40,53	579,0	38,21
	2	160,50	159,20	40,36	40,12	40,56	40,35	598,0	40,55
	3	160,15	159,34	39,97	40,18	40,38	40,22	565,0	38,38
	4	159,90	159,65	40,66	40,76	40,62	40,61	579,3	38,23

Dimensões dos corpos de prova e módulo dinâmico de elasticidade – CP's com fibras aleatórias

Teor de fibras aleatórias	Nº da amostra	Comprimento 01 (mm)	Comprimento 02 (mm)	Altura 01 (mm)	Altura 02 (mm)	Largura 01 (mm)	Largura 02 (mm)	Massa (gr)	Módulo Dinâmico de Elasticidade (GPa)
0%	1	160,42	160,31	40,21	40,05	40,11	40,06	629,3	44,30
	2	160,31	160,30	40,60	40,21	40,02	40,55	635,6	43,96
	3	160,44	160,16	40,44	40,67	40,03	40,17	618,5	43,05
	4	160,19	159,96	40,17	40,76	40,33	40,16	652,9	45,32
	5	160,25	160,20	39,81	39,69	40,14	40,50	633,3	44,96
2%	1	160,10	160,18	40,06	40,16	40,36	40,77	592,0	39,36
	2	159,43	160,41	40,87	40,64	40,43	40,42	602,7	39,74
	3	159,94	160,30	39,98	40,56	40,41	40,35	594,4	39,76
	4	160,85	160,56	40,76	40,63	40,06	40,06	605,5	39,88
	5	160,84	160,94	40,53	40,33	40,08	40,31	604,5	39,99
3,5%	1	160,16	159,90	39,74	39,93	39,89	40,18	599,8	40,66
	2	160,08	160,13	40,71	40,02	40,08	40,35	596,3	38,66
	3	160,13	160,06	39,83	40,93	40,40	40,00	603,9	39,58
	4	160,39	160,35	39,91	40,06	40,61	40,25	604,9	41,67
	5	160,21	160,08	39,53	40,36	40,43	40,59	599,3	38,78
5%	1	160,10	160,83	40,00	40,60	39,91	40,88	618,2	37,78
	2	160,15	160,19	40,31	40,26	40,01	40,24	593,9	36,49
	3	160,29	160,06	40,37	39,92	39,75	40,81	606,2	37,23
	4	159,95	160,28	39,93	40,51	40,31	40,92	607,6	36,35
	5	160,40	159,90	40,07	40,14	40,20	40,76	601,8	36,23

ANEXO C – Resistência à tração na flexão e à compressão dos CP's

Resistência à tração na flexão e à compressão – CP's com fibras ordenadas

Teor de fibras ordenadas	Nº da amostra	Resistência à tração			Resistência à compressão		
		Deformação máxima (mm)	Força máxima (kgf)	Tensão máxima (MPa)	Deformação máxima (mm)	Força máxima (kgf)	Tensão máxima (MPa)
0%	1	0,7205	330,2	1,649	2,629	11040,0	55,16
	2	0,6361	365,5	1,825	1,895	7397,0	57,56
	3	0,4673	318,4	1,590	2,174	11280,0	56,32
	4	0,4670	257,8	1,288	2,655	11650,0	58,20
2%	1	1,0060	241,6	1,206	2,382	10120,0	56,30
	2	0,6231	276,8	1,383	2,174	11830,0	59,06
	3	0,9087	248,8	1,243	2,317	11020,0	55,02
	4	0,3505	271,4	1,356	2,278	11580,0	57,84
3,5%	1	1,2530	285,0	1,423	2,246	11120,0	55,52
	2	1,2790	240,6	1,202	2,486	10450,0	52,20
	3	0,6491	255,1	1,274	2,557	11280,0	56,32
	4	1,0260	236,1	1,179	2,765	10390,0	51,91
5%	1	0,6751	248,8	1,243	2,330	9335,0	46,63
	2	0,6945	274,1	1,369	2,382	8583,0	49,87
	3	0,4544	263,3	1,315	2,181	10360,0	51,76
	4	1,3760	251,5	1,256	2,129	10870,0	54,29

Resistência à tração na flexão e à compressão – CP`s com fibras aleatórias

Teor de fibras aleatórias	Nº da amostra	Resistência à tração			Resistência à compressão		
		Deformação máxima (mm)	Força máxima (kgf)	Tensão máxima (MPa)	Deformação máxima (mm)	Força máxima (kgf)	Tensão máxima (MPa)
0%	1	1,2200	362,8	1,812	2,006	12420,0	62,03
	2	1,0580	399,9	1,997	2,265	13360,0	61,73
	3	0,7854	346,5	1,731	2,622	10340,0	59,70
	4	1,1810	397,2	1,984	1,480	11360,0	56,75
	5	0,5387	384,5	1,920	1,804	10670,0	59,30
2%	1	0,6815	361,0	1,803	2,577	10350,0	51,69
	2	0,6945	298,0	1,491	2,395	10190,0	50,90
	3	0,8503	289,5	1,446	2,298	10930,0	54,58
	4	0,8049	271,4	1,356	2,518	10470,0	52,27
	5	0,6101	283,2	1,414	2,694	11190,0	55,88
3,5%	1	1,1420	254,2	1,270	2,515	9423	47,07
	2	0,8373	261,5	1,306	2,44	10464	52,27
	3	0,9671	254,2	1,270	2,09	9633	48,11
	4	0,8049	279,5	1,396	2,411	11005	54,98
	5	0,3830	243,4	1,215	2,308	10485	52,38
5%	1	0,4479	323,0	1,613	3,648	9496,0	47,43
	2	0,7984	285,9	1,428	2,356	9756,0	48,73
	3	0,4284	285,0	1,423	2,467	9264,0	46,27
	4	0,3959	283,2	1,414	2,713	9467,0	47,28
	5	0,8373	232,5	1,161	2,032	10060,0	50,24

ANEXO D – Absorção de água por capilaridade

Absorção de água por capilaridade – CP's com fibras aleatórias

Teor de fibras aleatórias	Nº da amostra	Massa (g)			At10	At90	C (g/dm ² . min ^{1/2})	Cmédio (g/dm ² . min ^{1/2})	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
		inicial	10 min.	90 min.						
0%	1	327,92	328,08	328,10	0,01000	0,01125	0,0200	0,0220	0,016	74,69%
	2	336,82	336,97	336,98	0,00938	0,01000	0,0100			
	3	290,45	290,59	290,64	0,00875	0,01187	0,0500			
	4	300,81	300,98	300,99	0,01063	0,01125	0,0100			
	5	311,97	312,12	312,14	0,00937	0,01062	0,0200			
2%	1	266,70	266,86	266,91	0,01000	0,01313	0,0500	0,0680	0,032	46,97%
	2	291,28	291,44	291,47	0,01000	0,01188	0,0300			
	3	296,22	296,35	296,44	0,00812	0,01375	0,0900			
	4	296,21	296,35	296,46	0,00875	0,01563	0,1100			
	5	278,35	278,48	278,54	0,00812	0,01187	0,0600			
3,5%	1	282,35	282,51	282,65	0,01000	0,01875	0,1400	0,0760	0,039	51,47%
	2	297,54	297,67	297,71	0,00812	0,01062	0,0400			
	3	295,08	295,24	295,29	0,01000	0,01313	0,0500			
	4	287,90	287,99	288,07	0,00563	0,01063	0,0800			
	5	291,54	291,69	291,76	0,00937	0,01375	0,0700			
5%	1	319,12	319,30	319,35	0,01125	0,01438	0,0500	0,0880	0,024	27,13%
	2	322,67	322,83	322,93	0,01000	0,01625	0,1000			
	3	285,77	285,97	286,05	0,01250	0,01750	0,0800			
	4	307,41	307,57	307,67	0,01000	0,01625	0,1000			
	5	296,05	296,18	296,29	0,00812	0,01500	0,1100			

Absorção de água por capilaridade – CP's com fibras ordenadas

Teor de fibras ordenadas	Nº da amostra	Massa (g)			At10	At90	C (g/dm ² . min ^{1/2})	C _{médio} (g/dm ² . min ^{1/2})	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
		inicial	10 min.	90 min.						
0%	1	285,80	285,90	285,92	0,00625	0,00750	0,0200	0,0150	0,005	36,51%
	2	289,88	290,03	290,04	0,00937	0,01000	0,0100			
	3	292,06	292,25	292,27	0,01187	0,01312	0,0200			
	4	283,33	283,47	283,48	0,00875	0,00938	0,0100			
2%	1	291,44	291,56	291,57	0,00750	0,00812	0,0100	0,0300	0,021	69,12%
	2	285,11	285,21	285,25	0,00625	0,00875	0,0400			
	3	280,92	281,00	281,05	0,00500	0,00812	0,0500			
	4	286,53	286,63	286,65	0,00625	0,00750	0,0200			
3,5%	1	291,57	291,76	291,82	0,01187	0,01563	0,0600	0,0650	0,011	17,54%
	2	279,82	279,95	280,02	0,00812	0,01250	0,0700			
	3	292,83	292,96	293,01	0,00812	0,01125	0,0500			
	4	294,11	294,20	294,28	0,00562	0,01062	0,0800			
5%	1	308,17	308,33	308,39	0,01000	0,01375	0,0600	0,0775	0,022	28,61%
	2	301,15	301,31	301,42	0,01000	0,01688	0,1100			
	3	279,64	279,80	279,87	0,01000	0,01438	0,0700			
	4	320,27	320,47	320,54	0,01250	0,01688	0,0700			

ANEXO E – Análise estatística da resistência à compressão

PLANILHA DE DADOS EXPERIMENTAIS

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	Tensão Máxima (MPa)	55,16	56,30	55,52	46,63
		57,56	59,06	52,20	49,87
		56,32	55,02	56,32	51,76
		58,20	57,84	51,91	54,29
Fibras aleatórias	Tensão Máxima (MPa)	62,03	51,69	47,07	47,43
		61,73	50,90	52,27	48,73
		59,70	54,58	48,11	46,27
		56,75	52,27	54,98	47,28
		59,30	55,88	52,38	50,24

MÉDIA GLOBAL

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	Tensão Máxima (MPa)	53,71	53,71	53,71	53,71
		53,71	53,71	53,71	53,71
		53,71	53,71	53,71	53,71
		53,71	53,71	53,71	53,71
Fibras aleatórias	Tensão Máxima (MPa)	53,71	53,71	53,71	53,71
		53,71	53,71	53,71	53,71
		53,71	53,71	53,71	53,71
		53,71	53,71	53,71	53,71

MÉDIA A: Teor de fibra

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	Tensão Máxima (MPa)	58,53	54,84	52,31	49,17
		58,53	54,84	52,31	49,17
		58,53	54,84	52,31	49,17
		58,53	54,84	52,31	49,17
Fibras aleatórias	Tensão Máxima (MPa)	58,53	54,84	52,31	49,17
		58,53	54,84	52,31	49,17
		58,53	54,84	52,31	49,17
		58,53	54,84	52,31	49,17

Desvios de A (Teor de fibra): **SQA:** 423,847

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	4,82	1,13	-1,40	-4,54
	4,82	1,13	-1,40	-4,54
	4,82	1,13	-1,40	-4,54
	4,82	1,13	-1,40	-4,54
Fibras aleatórias	4,82	1,13	-1,40	-4,54
	4,82	1,13	-1,40	-4,54
	4,82	1,13	-1,40	-4,54
	4,82	1,13	-1,40	-4,54

MÉDIA B: Disposição das fibras

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas Tensão Máxima (MPa)	54,62	54,62	54,62	54,62
	54,62	54,62	54,62	54,62
	54,62	54,62	54,62	54,62
	54,62	54,62	54,62	54,62
Fibras aleatórias Tensão Máxima (MPa)	52,98	52,98	52,98	52,98
	52,98	52,98	52,98	52,98
	52,98	52,98	52,98	52,98
	52,98	52,98	52,98	52,98

Desvios de B (Disposição das fibras): **SQB:** 23,995

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	0,91	0,91	0,91	0,91
	0,91	0,91	0,91	0,91
	0,91	0,91	0,91	0,91
	0,91	0,91	0,91	0,91
Fibras aleatórias	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73
	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73
	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73
	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73

MÉDIA AB

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		56,81	57,06	53,99	50,64
	Tensão Máxima (MPa)	56,81	57,06	53,99	50,64
Fibras aleatórias		59,90	53,06	50,96	47,99
	Tensão Máxima (MPa)	59,90	53,06	50,96	47,99

Desvios de AB**SQAB:**

68,564

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		-2,63	1,30	0,77	0,56
		-2,63	1,30	0,77	0,56
		-2,63	1,30	0,77	0,56
		-2,63	1,30	0,77	0,56
Fibras aleatórias		2,10	-1,04	-0,61	-0,45
		2,10	-1,04	-0,61	-0,45
		2,10	-1,04	-0,61	-0,45
		2,10	-1,04	-0,61	-0,45
		2,10	-1,04	-0,61	-0,45

Desvios Residuais (erro experimental) SQR:

149,526

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		-1,65	-0,76	1,53	-4,01
		0,75	2,01	-1,79	-0,77
		-0,49	-2,04	2,33	1,12
		1,39	0,79	-2,08	3,65
Fibras aleatórias		2,13	-1,37	-3,89	-0,56
		1,83	-2,16	1,31	0,74
		-0,20	1,52	-2,85	-1,72
		-3,15	-0,79	4,02	-0,71
		-0,60	2,82	1,42	2,25

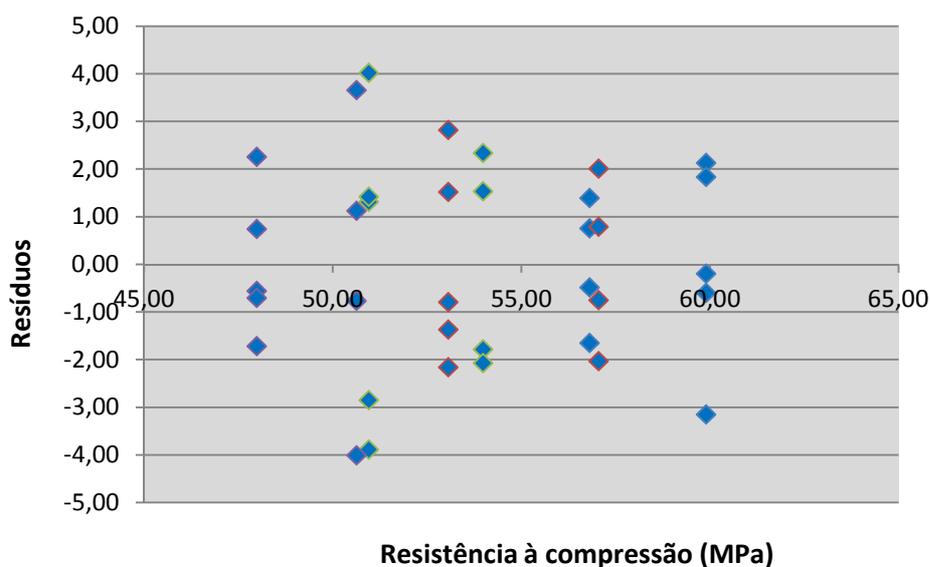


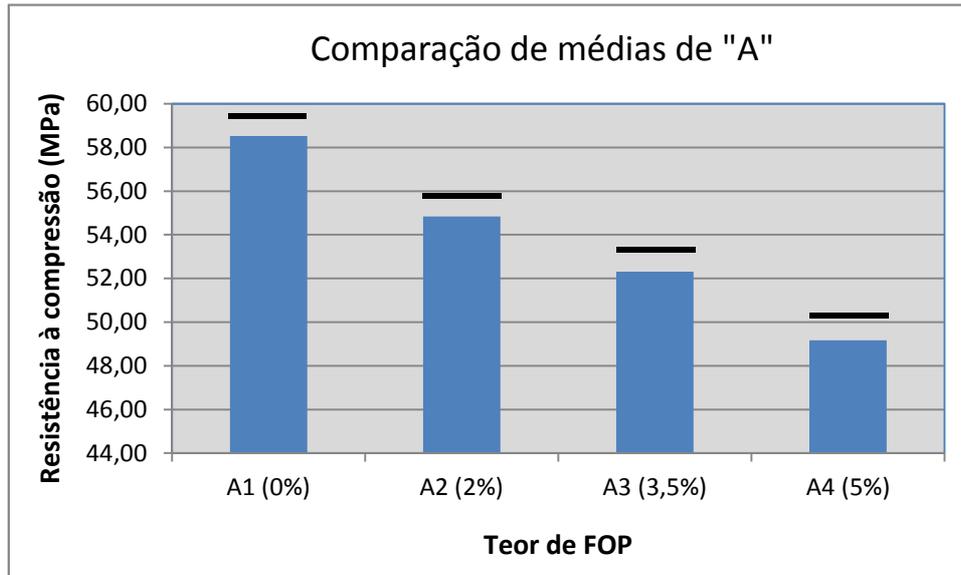
TABELA ANOVA

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabil.	Coment.
A: Teor de fibra	423,847	3	141,282	26,46	0,00%	S
B: Disposição das fibras	23,995	1	23,995	4,49	4,30%	S
AB	68,564	3	22,855	4,28	1,32%	S
Erro	149,526	28	5,340			
TOTAL		35				

COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE "A"

Sx = 0,77029712
Ld = 2,31089137

A1 (0%)	58,53	A1-A2	3,69	Difer.
A2 (2%)	54,84	A1-A3	6,22	Difer.
A3 (3,5%)	52,31	A1-A4	9,36	Difer.
A4 (5%)	49,17	A2-A3	2,53	Difer.
		A2-A4	5,67	Difer.
		A3-A4	3,14	Difer.



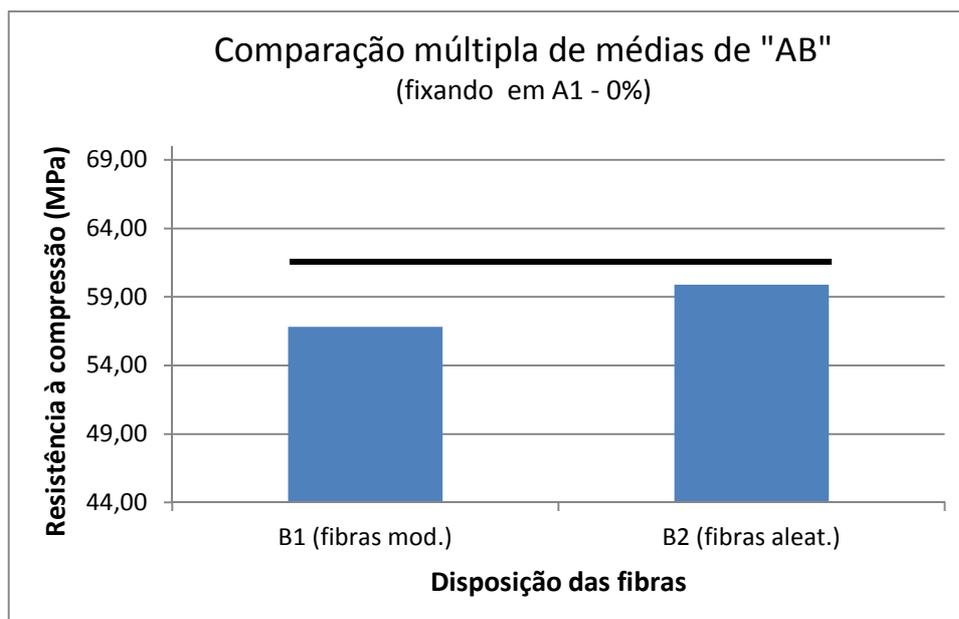
COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS DE "AB"

Fixando em A1(0%) e variando B

Sx = 1,08936464

Ld = 3,26809392

B1 (fibras mod.)	56,81	B2-B1	3,09	Igual
B2 (fibras aleat.)	59,90			



Fixando em A2(2%) e variando B

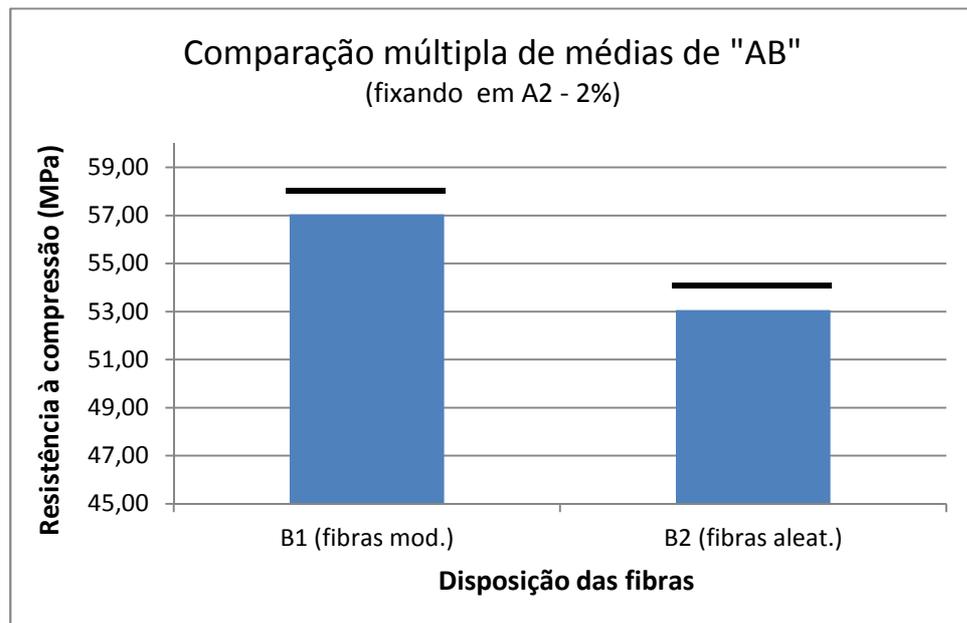
Sx = 1,08936464

Ld = 3,26809392

B1 (fibras mod.) 57,06

B2-B1 -3,99 **Difer.**

B2 (fibras aleat.) 53,06



Fixando em A3(3,5%) e variando B

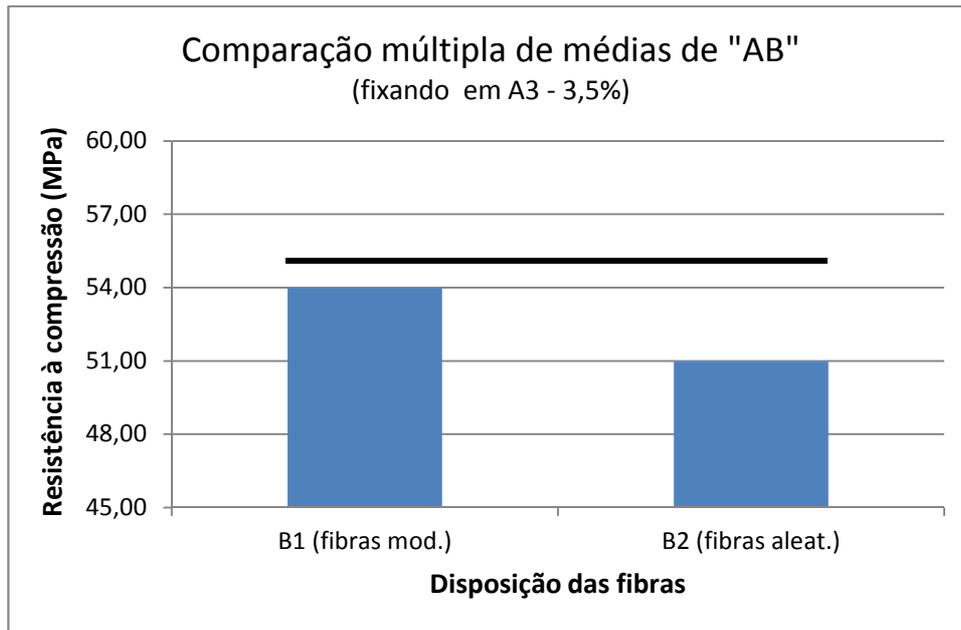
Sx = 1,08936464

Ld = 3,26809392

B1 (fibras mod.) 53,99

B2-B1 -3,03 **Igual**

B2 (fibras aleat.) 50,96



Fixando em A4(5%) e variando B

Sx = 1,08936464

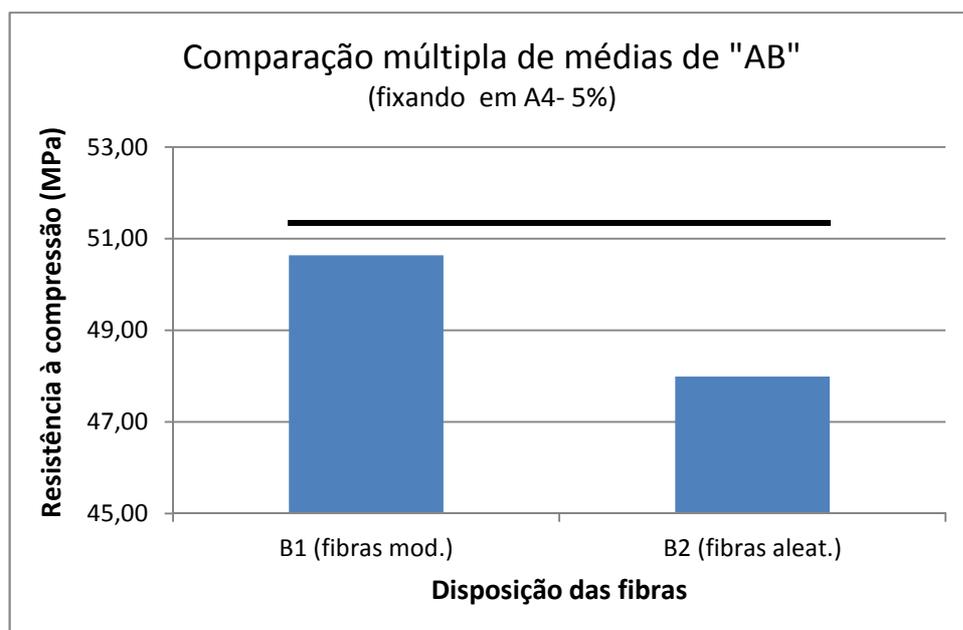
Ld = 3,26809392

B1 (fibras mod.) 50,64

B2-B1

-2,65 **Igual**

B2 (fibras aleat.) 47,99



ANEXO F – Análise estatística da resistência à tração

PLANILHA DE DADOS EXPERIMENTAIS

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas Tensão Máxima (MPa)	1,649	1,206	1,423	1,243
	1,825	1,383	1,202	1,369
	1,590	1,243	1,274	1,315
	1,288	1,356	1,179	1,256
Fibras aleatórias Tensão Máxima (MPa)	1,812	1,803	1,270	1,613
	1,997	1,491	1,306	1,428
	1,731	1,446	1,270	1,423
	1,984	1,356	1,396	1,414
	1,920	1,414	1,215	1,161

MÉDIA GLOBAL

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas Tensão Máxima (MPa)	1,451	1,451	1,451	1,451
	1,451	1,451	1,451	1,451
	1,451	1,451	1,451	1,451
	1,451	1,451	1,451	1,451
Fibras aleatórias Tensão Máxima (MPa)	1,451	1,451	1,451	1,451
	1,451	1,451	1,451	1,451
	1,451	1,451	1,451	1,451
	1,451	1,451	1,451	1,451

MÉDIA A: Teor de fibra

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas Tensão Máxima (MPa)	1,755	1,411	1,282	1,358
	1,755	1,411	1,282	1,358
	1,755	1,411	1,282	1,358
	1,755	1,411	1,282	1,358
Fibras aleatórias Tensão Máxima (MPa)	1,755	1,411	1,282	1,358
	1,755	1,411	1,282	1,358
	1,755	1,411	1,282	1,358
	1,755	1,411	1,282	1,358

Desvios de A (Teor de fibra): SQA: 1,183

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	0,304	-0,041	-0,170	-0,093
	0,304	-0,041	-0,170	-0,093
	0,304	-0,041	-0,170	-0,093
	0,304	-0,041	-0,170	-0,093
Fibras aleatórias	0,304	-0,041	-0,170	-0,093
	0,304	-0,041	-0,170	-0,093
	0,304	-0,041	-0,170	-0,093
	0,304	-0,041	-0,170	-0,093

MÉDIA B: Disposição das fibras

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas Tensão Máxima (MPa)	1,363	1,363	1,363	1,363
	1,363	1,363	1,363	1,363
	1,363	1,363	1,363	1,363
	1,363	1,363	1,363	1,363
Fibras aleatórias Tensão Máxima (MPa)	1,523	1,523	1,523	1,523
	1,523	1,523	1,523	1,523
	1,523	1,523	1,523	1,523
	1,523	1,523	1,523	1,523

Desvios de B (Disposição das fibras): SQB: 0,227

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	-0,089	-0,089	-0,089	-0,089
	-0,089	-0,089	-0,089	-0,089
	-0,089	-0,089	-0,089	-0,089
	-0,089	-0,089	-0,089	-0,089
Fibras aleatórias	0,071	0,071	0,071	0,071
	0,071	0,071	0,071	0,071
	0,071	0,071	0,071	0,071
	0,071	0,071	0,071	0,071

MÉDIA AB

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	Tensão Máxima (MPa)	1,588	1,297	1,270	1,296
		1,588	1,297	1,270	1,296
		1,588	1,297	1,270	1,296
		1,588	1,297	1,270	1,296
Fibras aleatórias	Tensão Máxima (MPa)	1,889	1,502	1,291	1,408
		1,889	1,502	1,291	1,408
		1,889	1,502	1,291	1,408
		1,889	1,502	1,291	1,408

Desvios de AB**SQAB:** 0,096

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		-0,078	-0,025	0,077	0,027
		-0,078	-0,025	0,077	0,027
		-0,078	-0,025	0,077	0,027
		-0,078	-0,025	0,077	0,027
Fibras aleatórias		0,063	0,020	-0,061	-0,021
		0,063	0,020	-0,061	-0,021
		0,063	0,020	-0,061	-0,021
		0,063	0,020	-0,061	-0,021

Desvios Residuais (erro experimental) SQR:

0,515

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		0,061	-0,091	0,154	-0,053
		0,237	0,086	-0,068	0,073
		0,002	-0,054	0,004	0,019
		-0,300	0,059	-0,091	-0,040
Fibras aleatórias		-0,077	0,301	-0,021	0,205
		0,108	-0,011	0,015	0,020
		-0,158	-0,056	-0,021	0,015
		0,095	-0,146	0,105	0,006
	0,031	-0,088	-0,076	-0,247	

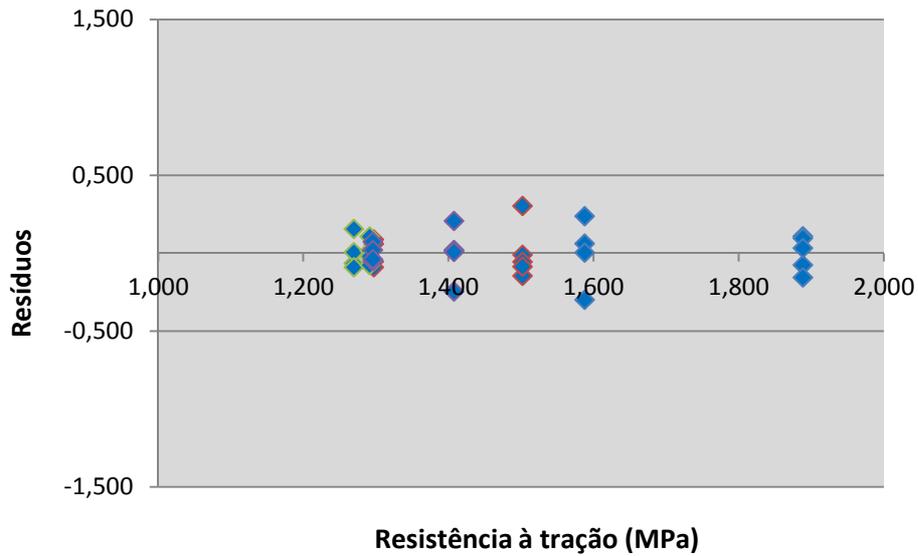
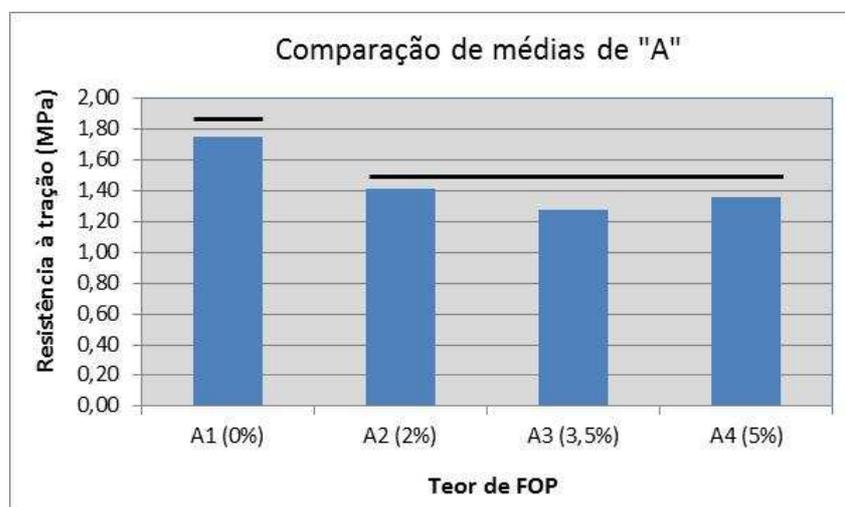


TABELA ANOVA

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabil.	Coment.
A: Teor de fibra	1,183	3	0,394	21,42	0,00%	S
B: Disposição das fibras	0,227	1	0,227	12,35	0,15%	S
AB	0,096	3	0,032	1,74	18,18%	NS
Erro	0,515	28	0,018			
TOTAL		35				

COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE "A"

	Sx =		0,04522688	
	Ld =		0,13568063	
A1 (0%)	1,76	A1-A2	0,34	Difer.
A2 (2%)	1,41	A1-A3	0,47	Difer.
A3 (3,5%)	1,28	A1-A4	0,40	Difer.
A4 (5%)	1,36	A2-A3	0,13	Igual
		A2-A4	0,05	Igual
		A3-A4	-0,08	Igual



ANEXO G – Análise estatística da absorção de água por capilaridade

**PLANILHA DE DADOS
EXPERIMENTAIS**

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		0,0200	0,0100	0,0600	0,0600
		0,0100	0,0400	0,0700	0,1100
		0,0200	0,0500	0,0500	0,0700
		0,0100	0,0200	0,0800	0,0700
Fibras aleatórias		0,0200	0,0500	0,1400	0,0500
		0,0100	0,0300	0,0400	0,1000
		0,0500	0,0900	0,0500	0,0800
		0,0100	0,1100	0,0800	0,1000
		0,0200	0,0600	0,0700	0,1100

**MÉDIA
GLOBAL**

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		0,056	0,056	0,056	0,056
		0,056	0,056	0,056	0,056
		0,056	0,056	0,056	0,056
		0,056	0,056	0,056	0,056
Fibras aleatórias		0,056	0,056	0,056	0,056
		0,056	0,056	0,056	0,056
		0,056	0,056	0,056	0,056
		0,056	0,056	0,056	0,056
		0,056	0,056	0,056	0,056

MÉDIA A: Teor de fibra

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		0,0189	0,0511	0,0711	0,0833
		0,0189	0,0511	0,0711	0,0833
		0,0189	0,0511	0,0711	0,0833
		0,0189	0,0511	0,0711	0,0833
Fibras aleatórias		0,0189	0,0511	0,0711	0,0833
		0,0189	0,0511	0,0711	0,0833
		0,0189	0,0511	0,0711	0,0833
		0,0189	0,0511	0,0711	0,0833
		0,0189	0,0511	0,0711	0,0833

Desvios de A (Teor de fibra): **SQA:** 0,021

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	-0,0372	-0,0050	0,0150	0,0272	
	-0,0372	-0,0050	0,0150	0,0272	
	-0,0372	-0,0050	0,0150	0,0272	
	-0,0372	-0,0050	0,0150	0,0272	
Fibras aleatórias	-0,0372	-0,0050	0,0150	0,0272	
	-0,0372	-0,0050	0,0150	0,0272	
	-0,0372	-0,0050	0,0150	0,0272	
	-0,0372	-0,0050	0,0150	0,0272	

MÉDIA B: Disposição das fibras

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	0,0469	0,0469	0,0469	0,0469	
	0,0469	0,0469	0,0469	0,0469	
	0,0469	0,0469	0,0469	0,0469	
	0,0469	0,0469	0,0469	0,0469	
Fibras aleatórias	0,0635	0,0635	0,0635	0,0635	
	0,0635	0,0635	0,0635	0,0635	
	0,0635	0,0635	0,0635	0,0635	
	0,0635	0,0635	0,0635	0,0635	
	0,0635	0,0635	0,0635	0,0635	

Desvios de B (Disposição das fibras): **SQB:** 0,002

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	-0,0092	-0,0092	-0,0092	-0,0092	
	-0,0092	-0,0092	-0,0092	-0,0092	
	-0,0092	-0,0092	-0,0092	-0,0092	
	-0,0092	-0,0092	-0,0092	-0,0092	
Fibras aleatórias	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	
	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	
	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	
	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	
	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074	

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		0,0150	0,0300	0,0650	0,0775
		0,0150	0,0300	0,0650	0,0775
		0,0150	0,0300	0,0650	0,0775
		0,0150	0,0300	0,0650	0,0775
Fibras aleatórias		0,0220	0,0680	0,0760	0,0880
		0,0220	0,0680	0,0760	0,0880
		0,0220	0,0680	0,0760	0,0880
		0,0220	0,0680	0,0760	0,0880
		0,0220	0,0680	0,0760	0,0880

Desvios de AB

SQAB:

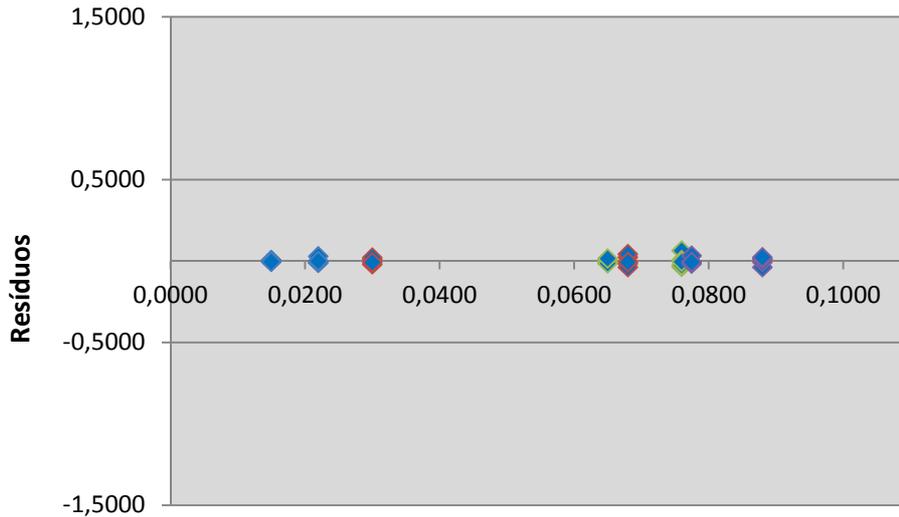
0,001

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		0,0053	-0,0119	0,0031	0,0034
		0,0053	-0,0119	0,0031	0,0034
		0,0053	-0,0119	0,0031	0,0034
		0,0053	-0,0119	0,0031	0,0034
Fibras aleatórias		-0,0043	0,0095	-0,0025	-0,0027
		-0,0043	0,0095	-0,0025	-0,0027
		-0,0043	0,0095	-0,0025	-0,0027
		-0,0043	0,0095	-0,0025	-0,0027
		-0,0043	0,0095	-0,0025	-0,0027

Desvios Residuais (erro experimental) SQR:

0,017

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		0,0050	-0,0200	-0,0050	-0,0175
		-0,0050	0,0100	0,0050	0,0325
		0,0050	0,0200	-0,0150	-0,0075
		-0,0050	-0,0100	0,0150	-0,0075
Fibras aleatórias		-0,0020	-0,0180	0,0640	-0,0380
		-0,0120	-0,0380	-0,0360	0,0120
		0,0280	0,0220	-0,0260	-0,0080
		-0,0120	0,0420	0,0040	0,0120
		-0,0020	-0,0080	-0,0060	0,0220



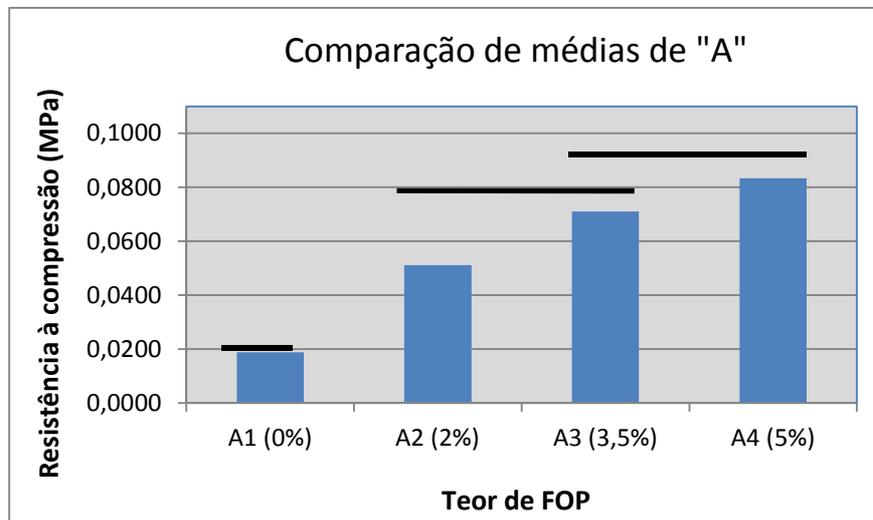
Absorção de água por capilaridade - C (g/dm² . min 1/2)

TABELA ANOVA

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabil.	Coment.
A: Teor de fibra	0,021	3	0,007	12,00	0,00%	S
B: Disposição das fibras	0,002	1	0,002	4,14	5,16%	S
AB	0,001	3	0,000	0,77	51,98%	NS
Erro	0,017	28	0,001			
TOTAL		35				

COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE "A"

	Sx =	0,00812477	
	Ld =	0,02437431	
A1 (0%)	0,0189	A1-A2	-0,0322 Difer.
A2 (2%)	0,0511	A1-A3	-0,0522 Difer.
A3 (3,5%)	0,0711	A1-A4	-0,0644 Difer.
A4 (5%)	0,0833	A2-A3	-0,0200 Igual
		A2-A4	-0,0322 Difer.
		A3-A4	-0,0122 Igual



ANEXO H – Análise estatística da transmitância de luz

**PLANILHA DE DADOS
EXPERIMENTAIS**

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		0	7	11	24
		0	8	11	26
		0	8	12	25
Fibras aleatórias		0	8	12	24
		0	8	12	22
		0	7	11	24

**MÉDIA
GLOBAL**

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		10,83	10,83	10,83	10,83
		10,83	10,83	10,83	10,83
		10,83	10,83	10,83	10,83
Fibras aleatórias		10,83	10,83	10,83	10,83
		10,83	10,83	10,83	10,83
		10,83	10,83	10,83	10,83

MÉDIA A: Teor de fibra

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		0,00	7,67	11,50	24,17
		0,00	7,67	11,50	24,17
		0,00	7,67	11,50	24,17
Fibras aleatórias		0,00	7,67	11,50	24,17
		0,00	7,67	11,50	24,17
		0,00	7,67	11,50	24,17

Desvios de A (Teor de fibra): **SQA:** 1833,667

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	-10,8333	-3,1667	0,6667	13,3333
	-10,8333	-3,1667	0,6667	13,3333
	-10,8333	-3,1667	0,6667	13,3333
Fibras aleatórias	-10,8333	-3,1667	0,6667	13,3333
	-10,8333	-3,1667	0,6667	13,3333
	-10,8333	-3,1667	0,6667	13,3333

MÉDIA B: Disposição das fibras

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	11,00	11,00	11,00	11,00
	11,00	11,00	11,00	11,00
	11,00	11,00	11,00	11,00
Fibras aleatórias	10,67	10,67	10,67	10,67
	10,67	10,67	10,67	10,67
	10,67	10,67	10,67	10,67

Desvios de B (Disposição das fibras): **SQB:** 0,667

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	0,1667	0,1667	0,1667	0,1667
	0,1667	0,1667	0,1667	0,1667
	0,1667	0,1667	0,1667	0,1667
Fibras aleatórias	-0,1667	-0,1667	-0,1667	-0,1667
	-0,1667	-0,1667	-0,1667	-0,1667
	-0,1667	-0,1667	-0,1667	-0,1667

MÉDIA AB

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	0,00	7,67	11,33	25,00
	0,00	7,67	11,33	25,00
	0,00	7,67	11,33	25,00
Fibras aleatórias	0,00	7,67	11,67	23,33
	0,00	7,67	11,67	23,33
	0,00	7,67	11,67	23,33

Desvios de AB**SQAB:**

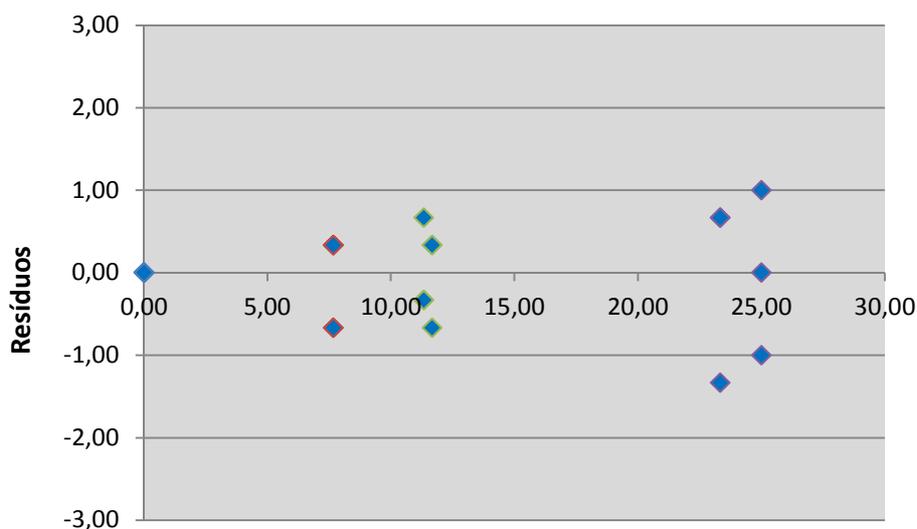
3,667

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	-0,1667	-0,1667	-0,3333	0,6667
	-0,1667	-0,1667	-0,3333	0,6667
	-0,1667	-0,1667	-0,3333	0,6667
Fibras aleatórias	0,1667	0,1667	0,3333	-0,6667
	0,1667	0,1667	0,3333	-0,6667
	0,1667	0,1667	0,3333	-0,6667

Desvios Residuais (erro experimental) SQR:

7,333

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	0,00	-0,67	-0,33	-1,00
	0,00	0,33	-0,33	1,00
	0,00	0,33	0,67	0,00
Fibras aleatórias	0,00	0,33	0,33	0,67
	0,00	0,33	0,33	-1,33
	0,00	-0,67	-0,67	0,67



Transmitância de luz - (Lux)

TABELA ANOVA

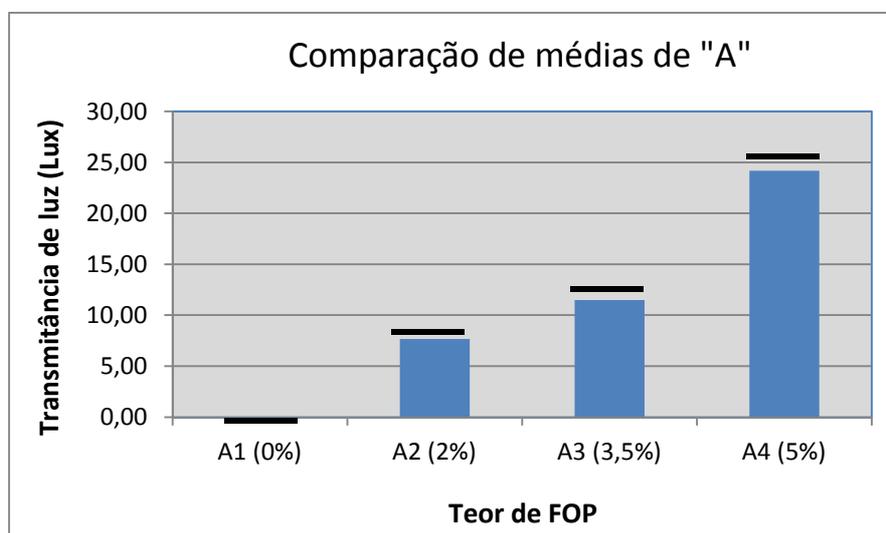
FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabil.	Coment.
A: Teor de fibra	1833,667	3	611,222	1333,58	0,00%	S
B: Disposição das fibras	0,667	1	0,667	1,45	24,53%	NS
AB	3,667	3	1,222	2,67	8,29%	NS
Erro	7,333	16	0,458			
TOTAL		23				

COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE "A"

Sx = 0,2763854

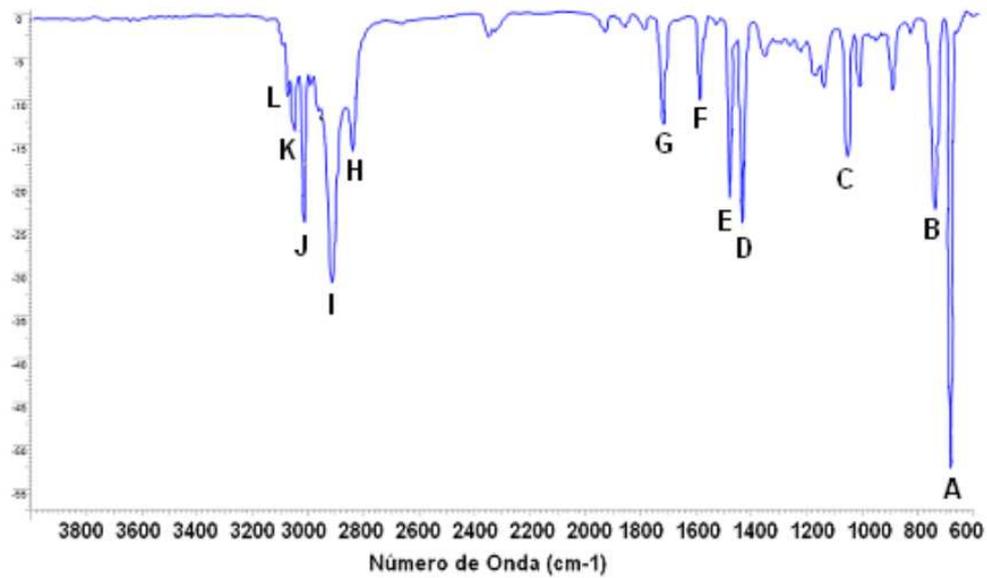
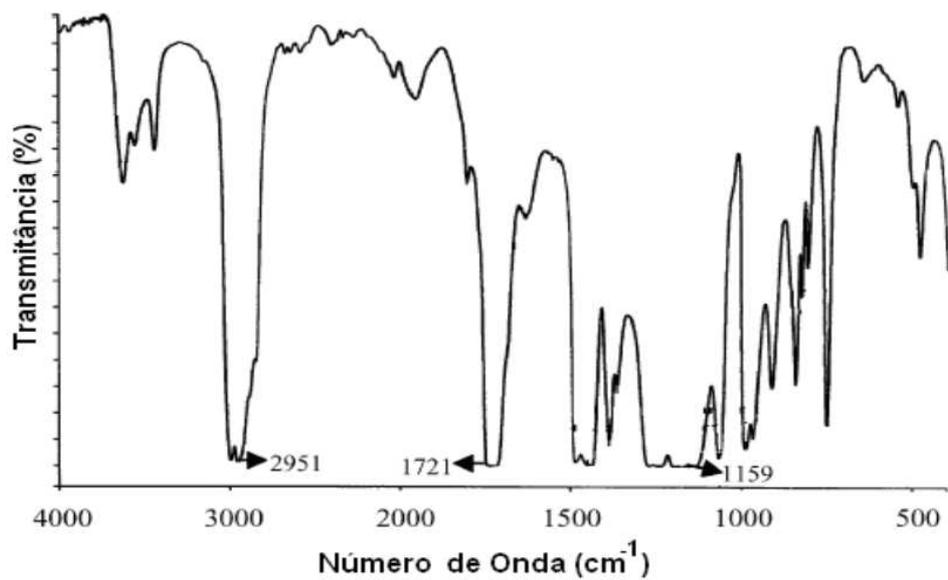
Ld = 0,8291562

A1 (0%)	0,00	A1-A2	-7,67	Difer.
A2 (2%)	7,67	A1-A3	-11,50	Difer.
A3 (3,5%)	11,50	A1-A4	-24,17	Difer.
A4 (5%)	24,17	A2-A3	-3,83	Difer.
		A2-A4	-16,50	Difer.
		A3-A4	-12,67	Difer.



ANEXO J – Espectros das fibras ópticas poliméricas

EIV do Poliestireno – PS (URIBE, 2010)

EIV do Polimetilmetacrilato – PMMA (RAMESH *et. al.*, 2007)

ANEXO K – Custos do m³ do concreto translúcido

		Teor de FOP calculado			
		0%	2%	3,5%	5%
Cimento CP V (R\$ 525/ton)	consumo (Kg)	624,00	624,00	624,00	624,00
	custo de mercado (R\$/Kg)	0,525	0,525	0,525	0,525
	custo na dosagem	R\$ 327,60	R\$ 327,60	R\$ 327,60	R\$ 327,60
Areia Fina (R\$ 85,00/m ³ - massa específica 2630Kg/m ³)	consumo (Kg)	1386,6	1386,6	1386,6	1386,6
	custo de mercado (R\$/Kg)	0,032	0,032	0,032	0,032
	custo na dosagem	R\$ 44,81	R\$ 44,81	R\$ 44,81	R\$ 44,81
Sílica Ativa (R\$ 1,40/Kg)	consumo (Kg)	69,30	69,30	69,30	69,30
	custo de mercado (R\$/Kg)	1,40	1,40	1,40	1,40
	custo na dosagem	R\$ 97,02	R\$ 97,02	R\$ 97,02	R\$ 97,02
Aditivo Superplastificante (R\$ 2,50/l - massa específica 1,08 Kg/l)	consumo (Kg)	7,80	7,80	7,80	7,80
	custo de mercado (R\$/Kg)	2,70	2,70	2,70	2,70
	custo na dosagem	R\$ 21,06	R\$ 21,06	R\$ 21,06	R\$ 21,06
Fibra Óptica Polimérica (FOP) com origem de luminárias chinesas (R\$ 0,035/m)	consumo (m)	0,0	159.236,0	276.662,0	398.090,0
	custo de mercado (R\$/m)	0,035	0,035	0,035	0,035
	custo na dosagem	R\$ 0,00	R\$ 5.573,26	R\$ 9.683,17	R\$ 13.933,15
Custo TOTAL aproximado do m³		R\$ 490,49	R\$ 6.063,75	R\$ 10.173,66	R\$ 14.423,64
Método com fibras ordenadas	Resistência média obtida ao 28 dias (MPa)	56,81	57,06	53,99	50,64
	R\$/MPa do m³	R\$ 8,63	R\$ 106,27	R\$ 188,44	R\$ 284,83
	Transmitância média de luz obtida (lux)	0,00	7,67	11,33	25,00
	R\$/Lux do m³	R\$ 0,00	R\$ 790,58	R\$ 897,94	R\$ 576,95
Método com fibras aleatórias	Resistência média obtida ao 28 dias (MPa)	59,90	53,06	50,96	47,99
	R\$/MPa do m³	R\$ 8,19	R\$ 114,28	R\$ 199,64	R\$ 300,56
	Transmitância média de luz obtida (lux)	0,00	7,67	11,67	23,33
	R\$/Lux do m³	R\$ 0,00	R\$ 790,58	R\$ 871,78	R\$ 618,24

ANEXO L – Análise estatística do módulo de elasticidade dinâmico

**PLANILHA DE DADOS
EXPERIMENTAIS**

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		41,51	39,41	39,16	38,21
		41,35	38,29	37,81	40,55
		41,37	39,17	39,65	38,38
		41,42	37,19	38,03	38,23
Fibras aleatórias		44,30	39,36	40,66	37,78
		43,96	39,74	38,66	36,49
		43,05	39,76	39,58	37,23
		45,32	39,88	41,67	36,35
		44,96	39,99	38,78	36,23

**MÉDIA
GLOBAL**

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		39,820	39,820	39,820	39,820
		39,820	39,820	39,820	39,820
		39,820	39,820	39,820	39,820
		39,820	39,820	39,820	39,820
Fibras aleatórias		39,820	39,820	39,820	39,820
		39,820	39,820	39,820	39,820
		39,820	39,820	39,820	39,820
		39,820	39,820	39,820	39,820

MÉDIA A: Teor de fibra

		Teor de fibra			
		0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas		43,0283	39,1995	39,3354	37,7176
		43,0283	39,1995	39,3354	37,7176
		43,0283	39,1995	39,3354	37,7176
		43,0283	39,1995	39,3354	37,7176
Fibras aleatórias		43,0283	39,1995	39,3354	37,7176
		43,0283	39,1995	39,3354	37,7176
		43,0283	39,1995	39,3354	37,7176
		43,0283	39,1995	39,3354	37,7176

Desvios de A (Teor de fibra):

SQA:

138,001

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	3,2081	-0,6207	-0,4848	-2,1026
	3,2081	-0,6207	-0,4848	-2,1026
	3,2081	-0,6207	-0,4848	-2,1026
	3,2081	-0,6207	-0,4848	-2,1026
Fibras aleatórias	3,2081	-0,6207	-0,4848	-2,1026
	3,2081	-0,6207	-0,4848	-2,1026
	3,2081	-0,6207	-0,4848	-2,1026
	3,2081	-0,6207	-0,4848	-2,1026

MÉDIA B: Disposição das fibras

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	39,3603	39,3603	39,3603	39,3603
	39,3603	39,3603	39,3603	39,3603
	39,3603	39,3603	39,3603	39,3603
	39,3603	39,3603	39,3603	39,3603
Fibras aleatórias	40,1881	40,1881	40,1881	40,1881
	40,1881	40,1881	40,1881	40,1881
	40,1881	40,1881	40,1881	40,1881
	40,1881	40,1881	40,1881	40,1881
	40,1881	40,1881	40,1881	40,1881

Desvios de B (Disposição das fibras):

SQB:

6,091

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	-0,4599	-0,4599	-0,4599	-0,4599
	-0,4599	-0,4599	-0,4599	-0,4599
	-0,4599	-0,4599	-0,4599	-0,4599
	-0,4599	-0,4599	-0,4599	-0,4599
Fibras aleatórias	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679
	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679
	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679
	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679
	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679

MÉDIA AB

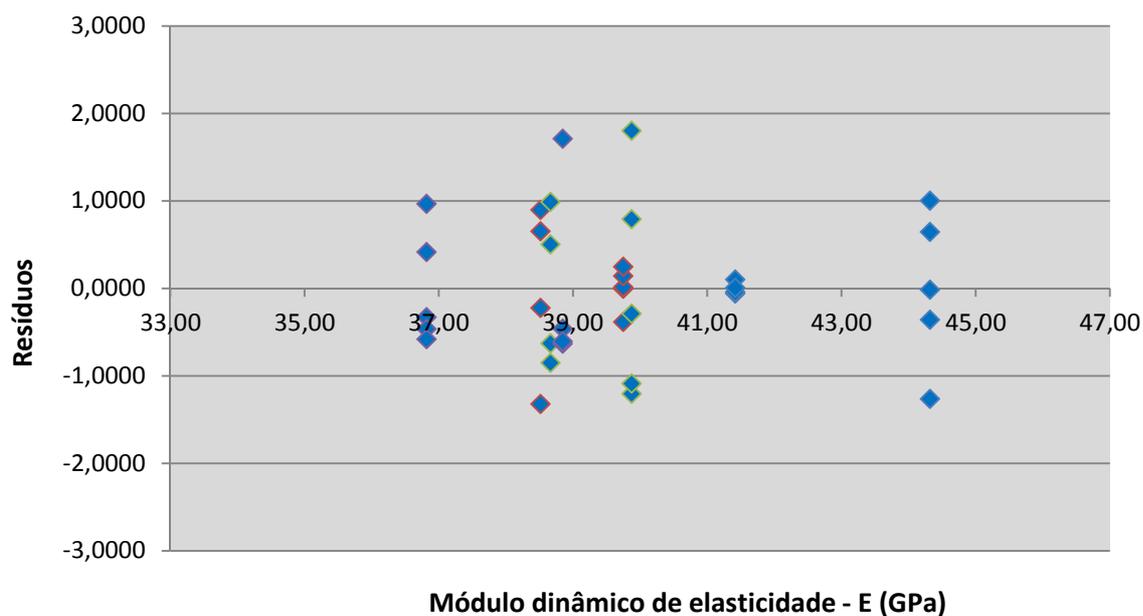
	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	41,4163	38,5158	38,6647	38,8446
	41,4163	38,5158	38,6647	38,8446
	41,4163	38,5158	38,6647	38,8446
	41,4163	38,5158	38,6647	38,8446
Fibras aleatórias	44,3180	39,7465	39,8719	36,8160
	44,3180	39,7465	39,8719	36,8160
	44,3180	39,7465	39,8719	36,8160
	44,3180	39,7465	39,8719	36,8160
	44,3180	39,7465	39,8719	36,8160

Desvios de AB**SQAB:** 28,370

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	-1,1522	-0,2239	-0,2108	1,5869
	-1,1522	-0,2239	-0,2108	1,5869
	-1,1522	-0,2239	-0,2108	1,5869
	-1,1522	-0,2239	-0,2108	1,5869
Fibras aleatórias	0,9218	0,1791	0,1686	-1,2695
	0,9218	0,1791	0,1686	-1,2695
	0,9218	0,1791	0,1686	-1,2695
	0,9218	0,1791	0,1686	-1,2695
	0,9218	0,1791	0,1686	-1,2695

Desvios Residuais (erro experimental) SQR: 21,029

	Teor de fibra			
	0%	2%	3,5%	5%
Fibras ordenadas	0,0979	0,8964	0,4995	-0,6341
	-0,0616	-0,2245	-0,8540	1,7074
	-0,0420	0,6517	0,9854	-0,4630
	0,0057	-1,3235	-0,6310	-0,6102
Fibras aleatórias	-0,0161	-0,3848	0,7874	0,9646
	-0,3609	-0,0079	-1,2072	-0,3298
	-1,2663	0,0107	-0,2900	0,4131
	1,0015	0,1378	1,8000	-0,4663
	0,6418	0,2443	-1,0902	-0,5817

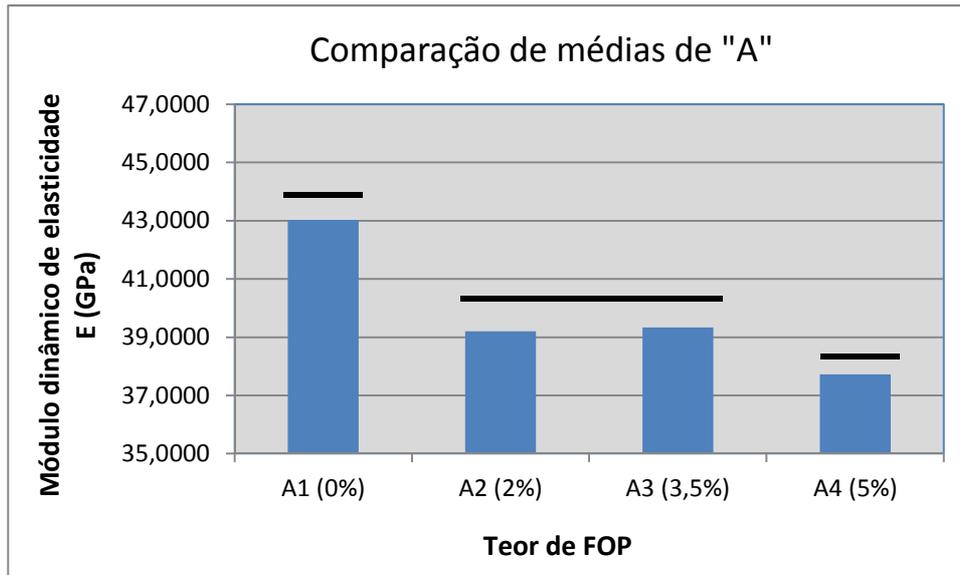
**TABELA ANOVA**

FONTE	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabil.	Coment.
A: Teor de fibra	138,001	3	46,000	61,25	0,00%	S
B: Disposição das fibras	6,091	1	6,091	8,11	0,82%	S
AB	28,370	3	9,457	12,59	0,00%	S
Erro	21,029	28	0,751			
TOTAL		35				

COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE "A"

Sx = 0,28887112
Ld = 0,86661337

A1 (0%)	43,0283	A1-A2	3,8288	Difer.
A2 (2%)	39,1995	A1-A3	3,6929	Difer.
A3 (3,5%)	39,3354	A1-A4	5,3108	Difer.
A4 (5%)	37,7176	A2-A3	-0,1359	Igual
		A2-A4	1,4819	Difer.
		A3-A4	1,6178	Difer.



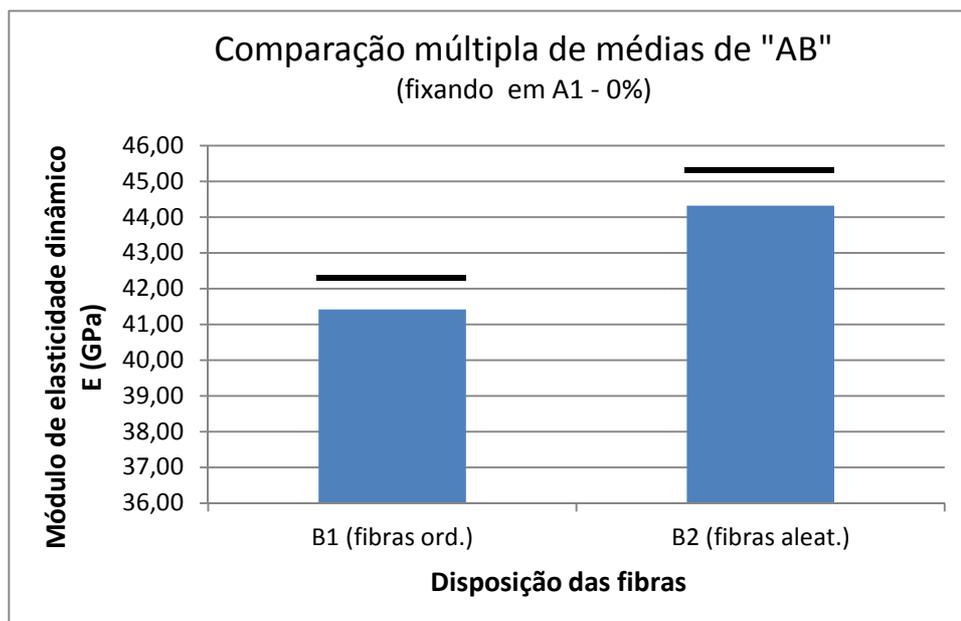
COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS DE "AB"

Fixando em A1(0%) e variando B

Sx = 0,40852546

Ld = 1,22557637

B1 (fibras ord.)	41,42	B2-B1	2,90	Difer.
B2 (fibras aleat.)	44,32			



Fixando em A2(2%) e variando B

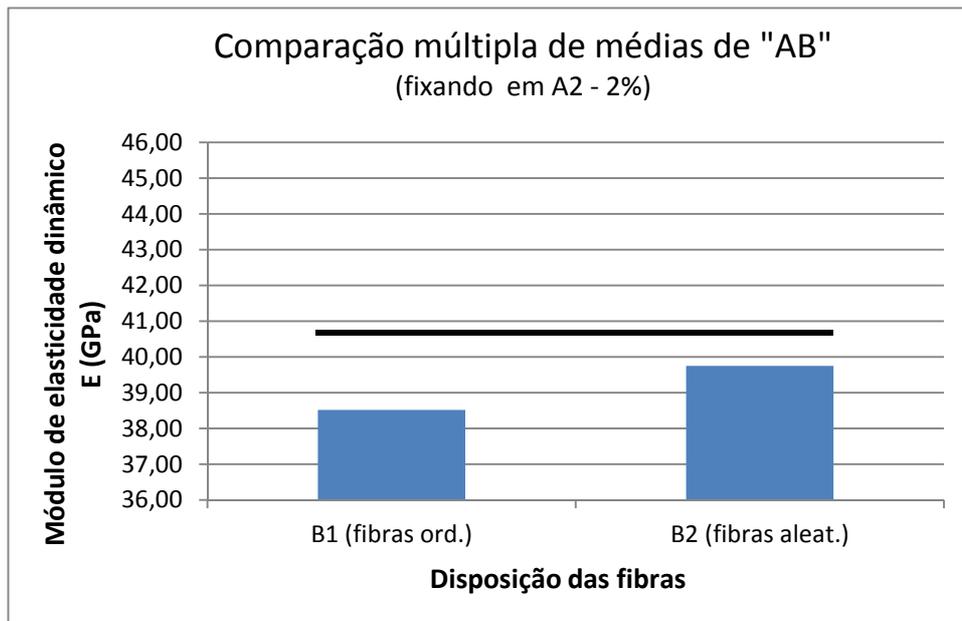
Sx = 0,40852546

Ld = 1,22557637

B1 (fibras ord.) 38,52

B2-B1 1,23 **Igual**

B2 (fibras aleat.) 39,75



Fixando em A3(3,5%) e variando B

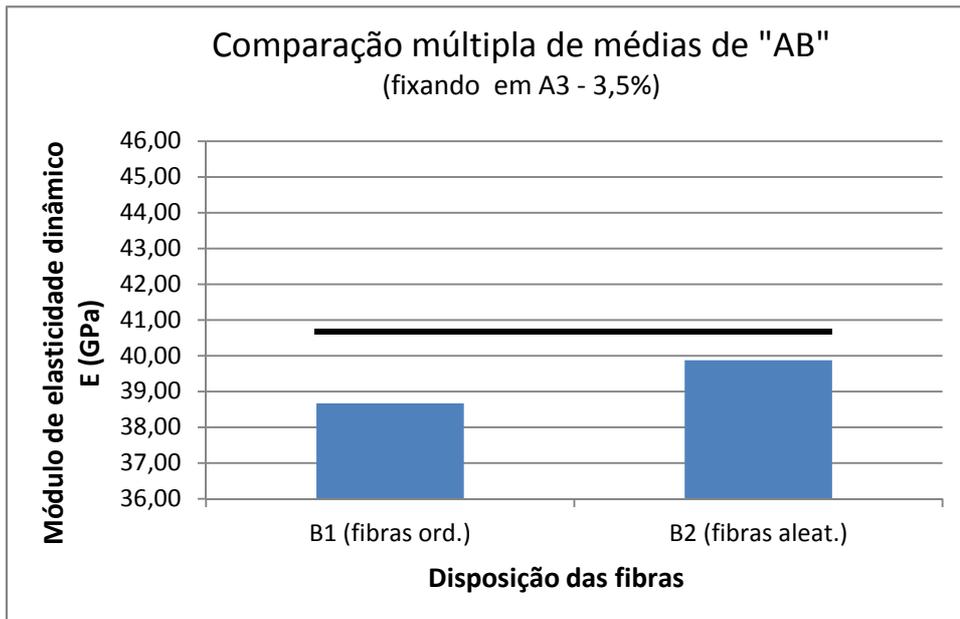
Sx = 0,40852546

Ld = 1,22557637

B1 (fibras ord.) 38,66

B2-B1 1,21 **Igual**

B2 (fibras aleat.) 39,87



Fixando em A4(5%) e variando B

Sx = 0,40852546

Ld = 1,22557637

B1 (fibras ord.) 38,84

B2-B1

-2,03 **Difer.**

B2 (fibras aleat.) 36,82

