



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA**



# **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

## **Dissertação de Mestrado**

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES  
UTILIZANDO RESÍDUOS INDUSTRIAIS  
E FIBRAS DE SISAL**

**NIVALDO TIMÓTEO DE ARRUDA FILHO**

Biblioteca UFPG  
SMBC\_CDSA  
CAMPUS DE SUMÉ  
Reg. 14301/14

**campina Grande  
Paraíba**





UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES UTILIZANDO RESÍDUOS INDUSTRIAIS E FIBRAS  
DE SISAL**

**NIVALDO TIMÓTEO DE ARRUDA FILHO**

**CAMPINA GRANDE-PB**

**2011**

**NIVALDO TIMÓTEO DE ARRUDA FILHO**

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES UTILIZANDO RESÍDUOS INDUSTRIAIS E FIBRAS  
DE SISAL**

**COMPOSITOS CIMENTÍCIOS LEVES UTILIZANDO RESÍDUOS INDUSTRIAIS E FIBRAS  
DE SISAL**

NIVALDO TIMÓTEO DE ARRUDA FILHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola.

**Orientador:** Prof. Antonio Farias Leal

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2011**

ex.01

14301114 12-03-14

*Helena Costa*

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A779c Arruda Filho, Nivaldo Timóteo

Compositos Cimentícios Leves Utilizando Resíduos Industriais e Fibras de Sisal / Nivaldo Timóteo Arruda Filho. — Campina Grande, 2011.

96 f.: il. col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientadores: Prof. Dr. Antonio Farias Leal e Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa.

Referências:

1. Fibra de Sisal. 2. Resíduo. 3. Reologia. 4. Resistência Mecânica. I. Título.

CDU – 679(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



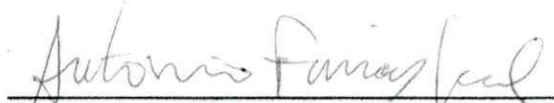
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO MESTRADO

Nivaldo Timóteo de Arruda Filho

COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES UTILIZANDO RESÍDUOS  
INDUSTRIAIS E FIBRA DE SISAL

BANCA EXAMINADORA

PARECER



Dr. Antonio Farias Leal – Orientador

APPROVADO



Dr. Sandro Marden Torres – Examinador

APPROVADO



Dr. Alexandre José Soares Miná – Examinador

APPROVADO

FEVEREIRO 2011

## DEDICATÓRIA

Primeiramente a **DEUS**, pai todo poderoso, pelo dom da vida, pela força, saúde e coragem para frentar e superar os momentos mais difíceis de nossas vidas onde, na hora em que pensamos em assistir, é o primeiro a tocar em sua cabeça lhe dando forças para continuar e vencer toda a caminhada, nunca deixando que as dificuldades cancelem as vitórias por **ELE** programadas.

Em especial ao meu pai, **NIVALDO TIMÓTEO DE ARRUDA** (*in memorian*) que, de onde quer que esteja, tenho a certeza da infinita torcida e vibração de cada degrau meu alcançado e, ao mesmo tempo da tristeza de não estar presente, compartilhando, seu grande sonho em participar de mais uma etapa acadêmica conclusa em minha vida. Agradeço por todo seu carinho, incentivo, compreensão e por toda sua dedicação, quando em vida, para comigo. Saudades eternas. **AMO VOCÊ.**

A minha mãe **JOSEFA LOPES DE ARRUDA** e a minha irmã **JAQUELINE LOPES TIMÓTEO DE ARRUDA**, por toda dedicação e apoio, estando sempre presente nas dificuldades que a vida oferece, ajudando a enfrentar e superar cada uma delas individualmente.

A minha namorada e futura esposa **JULIANA QUEIROZ DE SÁ E BENEVIDES**, pelo seu grande amor, carinho e paciência, dedicando parte de sua vida para poder me fazer feliz, tornando cada dia sempre mais bonito e com um propósito maior de querer vencer.

A minha segunda família, meus tios **GILDIVAN LOPES E YARA ROCHA**, aos meus primos **ANDRÉ, ADRIANA, ALESSANDRA, WALTER, ARTHUR, BRUNO, JANDUÍ, ISABELLA, HALEX, MARIA EDUARDA e WALTINHO (O GORDINHO)**, que sempre me acolheram e proporcionaram momentos especiais e inesquecíveis.

A meu primo **AGAMENILSON**, e aos meus tios **OÊMIO TIMÓTEO** (*in memorian*), **CLÁUDIO TIMÓTEO** e **FRANCISCO TIMÓTEO** por, na ausência do meu pai, me mostrarem o caminho de um homem vencedor, honesto e honroso com suas atividades.

Aos meus **AVÓS** (*in memorian*), **TIOS, PRIMOS, CUNHADOS E AMIGOS**, que de alguma forma contribuíram para a chegada desta grande realização não esquecendo, dos que hoje considero como meus segundos Pais, meu sogro e sogra, **SAULO E CARMEN BENEVIDES.**

## AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, por me tornar um mestre em minha profissão, abrindo portas para um futuro melhor.

À CAPES, e a toda equipe Pró-Engenharia, pelo apoio para conclusão deste trabalho e auxílio para novas pesquisas.

Ao Orientador e Professor Dr. Antonio Farias Leal e ao Co-orientador e Professor Normando Perazzo Barbosa, por toda paciência, dedicação, ensinamento e, além de tudo, toda sua amizade nesses anos de pesquisas e trabalhos, mostrando-me sempre a melhor maneira de enfrentar as dificuldades que a vida estudantil oferece.

Aos professores, Dr. Sandro Marden Torres e Dr. Alexandre Soares Miná, por fazerem parte da minha banca examinadora.

A todos os professores, funcionários e alunos do CTRN/UFCG, em especial, ao programa de engenharia Agrícola.

Aos meus companheiros de Centro: Fernando, Dona Vilma, Juliana, Isabelle, Mavinieux, Uyara, Laura, Karol, Mércia, Aline, Malheiros, Josinaldo, Carolina, Fernando, Andreia, Suellen... dentre muitos outros, que nunca falharam nas horas que mais precisei, estando presente em todos os momentos e, em cada passo dado para minha nova formação.

Aos meus amigos e irmãos: Indra, Carol, Fagner, Pedro (cabaré), Êgly, Weligton (lula), Fábio (Fabinho), Jessé, Camilo, Maurício, Luiz Paulo, Ana Marcia, Richardson, Brunna, Hanna, Junhão, Júnior (Negão da xerox), Paulo, César (cabeção), Gustavo (galalau), André (doido), Flaviano (vaqueiro), Antônio (Tonhão-*in memoriam*), Fernando (vereador), Luizinho (batman), Madson, Lamartine, Maira, Ana Emília, Daieny, Neto, Renata, Dany, Fernanda, Lidiana, Carol, Magna, Marcela, Deisy, Daniel, Jailson, Isaac, Dimas (velho Jimmy), Raquel Araruna, Silvia, Silvana, Thiago (foguinho), Tarcisio, Gianca...



2.10.2 Limitações no uso de concretos leves.....	27
<b>2.11 Classificação dos concretos leves .....</b>	<b>28</b>
<b>2.12 Tipos de concretos leves .....</b>	<b>28</b>
2.12.1 Concreto com agregados leves.....	28
2.12.2 Tipos de agregados leves.....	29
<b>2.13 Concreto sem finos.....</b>	<b>29</b>
<b>2.14 Concreto celular.....</b>	<b>30</b>
<b>CAPÍTULO 3 - PROPRIEDADES DA ARGAMASSA COM FIBRAS.....</b>	<b>31</b>
<b>3.0 Argamassa .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Características Reológicas.....</b>	<b>31</b>
3.1.1 A importância da Reologia de Argamassa.....	32
3.1.2 Parâmetros Reológicos.....	33
<b>3.2 Fatores que Afetam os Parâmetros Reológicos.....</b>	<b>34</b>
3.2.1 Influência da matriz.....	34
3.2.2 Influência da Fibra .....	36
3.2.3 Influência do Aditivo .....	40
3.2.4 Aditivos Superplastificantes.....	41
3.2.4 Materiais Pozolânicos.....	42
3.2.4.1 Metacaulim.....	43
3.2.4.2 Resíduo de tijolo moído.....	43
3.2.5 Microestrutura do Compósito.....	44
3.2.6 Interação fibra-fibra e fibra-agregado .....	45
3.2.7 Empacotamento das Partículas.....	46
3.2.7.1 Interação fibra com fibra .....	46
3.2.7.2 Interação do agregado com fibra .....	47
<b>3.3 Propriedades Mecânicas.....</b>	<b>49</b>
3.3.1 Resistência a compressão.....	50
3.3.2 Resistência a flexão.....	50
<b>CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1 Introdução.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2 Produção das placas de EVA.....</b>	<b>51</b>

4.2.1	Caracterização do resíduo de EVA .....	51
4.2.2	Elaboração das placas (EVA) .....	53
<b>4.3</b>	<b>Caracterização dos materiais do novo compósito de revestimento.....</b>	<b>53</b>
4.3.1	Cimento.....	53
4.3.2	Adições pozolânicas.....	54
4.3.3	Aditivo químico superplastificante.....	55
4.3.4	Água.....	55
4.3.5	Fibras.....	56
<b>4.4</b>	<b>Materiais e Métodos para realização dos Ensaios.....</b>	<b>57</b>
4.4.1	Técnica de caracterização reológica.....	57
4.4.2	Produção da mistura auto-adensável.....	59
4.4.3	Moldagem e cura dos corpos-de-prova para formação da matriz cimentícia.....	60
4.4.4	Análise de resistência à compressão simples das pastas auto-adensáveis.....	61
4.4.5	Ensaio de Flexão.....	62
4.4.6	Produção do novo compósito .....	62
4.4.7	Distribuição e técnica de alinhamento das fibras.....	63
4.4.8	Desenvolvimento dos compósitos leves.....	64
<b>4.5</b>	<b>Avaliação dos compósitos leves.....</b>	<b>65</b>
4.5.1	Resistência à flexão do novo compósito.....	65
 <b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>		<b>67</b>
<b>5.1</b>	<b>Caracterização dos Materiais e produção da placa de EVA .....</b>	<b>67</b>
5.1.1	Agregados de EVA utilizados .....	67
5.1.2	Desempenho físico das placas de EVA produzidas.....	69
5.1.3	Desempenho mecânico das placas de EVA.....	69
<b>5.2</b>	<b>Caracterização das adições pozolânicas da pasta de revestimento.....</b>	<b>69</b>
5.2.1	Massa e área específica.....	70
5.2.2	Distribuição Granulométrica.....	70
5.2.3	Perda de massa dos componentes da mistura.....	73
<b>5.3</b>	<b>Reologia do material .....</b>	<b>75</b>
<b>5.4</b>	<b>Atividade pozolânica com o cimento Portland.....</b>	<b>77</b>
<b>5.5</b>	<b>Ensaio de resistência à flexão e método de produção do novo compósito. ....</b>	<b>79</b>
5.5.1	Ensaio médios de flexão da pasta matriz auto-adensável.....	79

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 Estrutura de fibra de sisal. FONTE: Lima, 2004.* \_\_\_\_\_ 15
- Figura 2.2 Micrografia de argamassa reforçada com fibras curtas de sisal. FONTE: Lima, 2004.* \_\_\_\_\_ 15
- Figura 2.3 Resíduos de blocos cerâmicos lançados no meio-ambiente (Santa Rita-PB)* \_\_\_\_\_ 23
- Figura 2.4 Resíduos de EVA estocados em galpão. FONTE: BEZERRA, 2002.* \_\_\_\_\_ 24
- Figura 3.1. Efeito do tamanho do agregado na concentração máxima de fibras de aço. Fonte: Grunewald, 2004.* \_\_\_\_\_ 34
- Figura 3.2 Efeito da quantidade de agregado graúdo na fração volumétrica de fibras de aço. Fonte: Swamy; Mangat citado por Grunewald (2004).* \_\_\_\_\_ 35
- Figura 3.3 Relação entre a fração volumétrica da fibra de polipropileno e a tensão de escoamento. Fonte: Ponikiewski; Szwabowski (2005).* \_\_\_\_\_ 36
- Figura 3.4 Efeito do formato da partícula na viscosidade. FONTE: Rohn, 2008.* \_\_\_\_\_ 36
- Figura 3.5 Efeito do tipo de material da fibra no valor da tensão de escoamento. Fonte: Ponikiewski; Szwabowski (2005).* \_\_\_\_\_ 38
- Figura 3.6 Efeito do comprimento e do teor de fibra no comportamento do estado fresco de concreto, a partir do ensaio VeBe. Fonte: Johnston (1995).* \_\_\_\_\_ 38
- Figura 3.7. Efeito do comprimento e da fração volumétrica da fibra, na tensão de escoamento de argamassas. Fonte: Ponikiewski; Szwabowski (2005).* \_\_\_\_\_ 39
- Figura 3.8. Relação entre água/cimento e volume de fibra. Fonte: Worner; Techen (1995)* \_\_\_\_\_ 40
- Figura 3.9 Esquema das posições das forças de interação entre as fibras: (a) concentração de fibras em suspensão submetidas a uma força externa de cisalhamento (FONTE: Servais et al., (2002)); (b) detalhe da interação - secção transversal da fibra interagindo com o meio*

5.5.2 Resultados do método de produção do novo compósito.....	81
5.5.3 Resultados dos ensaios de flexão do novo compósito.....	82
<b>CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>90</b>

## ABSTRACT

It is estimated this work, the production of lightweight construction elements from cement matrix incorporating industrial waste and sisal fibers as well as adding the capability of these fibers and the use of metakaolin and waste production of clay bricks ground, as partial replacement of Portland cement. The materials were characterized physically, chemically and mineralogically, and determined the mechanical strength of the composites produced. We used to work against the pulp rheology for coating the array with appropriate content of pozzolanic additions and superplasticizer. We evaluated the resistance of the plate, EVA matrix coating folder found with and without addition of new fibers and the composite formed by the union of these two elements. We used the technique of alignment of fibers with a view to increasing resistance to the new lightweight composite. Tests rheology of the material indicated that the crushed brick was more efficient than the metakaolin to the same level of replacement and that the percentage of 2.1% of superplasticizer and mixing M 80Ci 10TM 10MC was considered ideal for making matrix resilient and self-compacting, which was not observed in tests of strength, where metakaolin surpassed the results obtained with the addition of crushed brick. The addition of the matrix with aligned fibers increased significantly in tensile strength in bending the new lightweight composite outperforming 74.78% of the board of EVA, while 35.98% of the plate coated with EVA matrix without fibers and 4, 23% of the plate coated with EVA matrix added fiber distributed randomly.

**Keywords:** sisal fibers, residue, rheology, mechanical strength.



## RESUMO

Avalia-se neste trabalho, a produção de elementos construtivos leves a partir de matrizes cimentícias com incorporação de resíduos industriais e fibras de sisal bem como, a potencialidade da adição dessas fibras e o uso da metacaulinita e dos resíduos de produção de tijolos cerâmicos moídos, como substitutos parciais do cimento Portland. Os materiais foram caracterizados física, química e mineralogicamente, além de determinado as resistências mecânicas dos compósitos produzidos. Utilizou-se de trabalhos de reologia para encontro da pasta matriz de revestimento com adequado teor de adições pozolânicas e aditivo superplastificante. Foram avaliadas as resistências da placa de EVA, da pasta matriz de revestimento encontrada com e sem adição de fibras e do novo compósito formado pela união destes dois elementos. Utilizou-se a técnica de alinhamento de fibras com intuito de incrementar resistência ao novo compósito leve. Os ensaios de reologia do material indicaram que o tijolo moído mostrou-se mais eficiente que a metacaulinita para o mesmo teor de substituição e que, a porcentagem de 2,1% de aditivo superplastificante e a mistura M 80Ci 10TM 10MC foi considerada ideal para tornar a matriz resistente e auto-adensável; o que não se observou nos ensaios de resistência mecânica, onde a metacaulinita superou os resultados obtidos com a adição do tijolo moído. A adição da matriz com fibras alinhadas incrementou de forma significativa na resistência a tração na flexão do novo compósito leve superando em 74,78% a placa de EVA, em 35,98% a placa de EVA revestida com matriz sem fibras e em 4,23% a placa de EVA revestida com matriz adicionada de fibras distribuídas de forma randômica.

**Palavras-chave:** fibras de sisal, resíduo, reologia, resistência mecânica.

**LISTA DE TABELAS**

<i>Tabela 2.1 Composição de Fibras oriundas de cultivo principal e de subprodutos da agricultura.FONTE: Santos, 2006.</i>	12
<i>Tabela 2.2 Propriedades mecânicas de fibras vegetais e de fibras convencionais usadas como reforço.FONTE: Bledzki &amp; Gassan, 1999, citado em SANTOS, 2006.</i>	13
<i>Tabela 2.3 Propriedades físicas e mecânicas das fibras de Sisal.FONTE, Toledo Filho, 1997.</i>	16
<i>Tabela 2.4 Tipos de concretos leves.FONTE: Neville, 1997.</i>	28
<i>Tabela 4.1 Propriedades do Mset superplastificante utilizado na pesquisa.</i>	55
<i>Tabela 4.2 Propriedades mecânicas das fibras de Sisal.</i>	56
<i>Tabela 5.1 Caracterização dos agregados obtidos dos resíduos de EVA.</i>	68
<i>Tabela 5.2 Propriedades físicas das placas</i>	70
<i>Tabela 5.3 Resistências mecânicas obtidas para a placa.</i>	70
<i>Tabela 5.4 Caracterização dos materiais.</i>	71
<i>Tabela 5.5 – Análise química das adições minerais utilizadas na pesquisa.</i>	73
<i>Tabela 5.6 pH da água de cura dos elementos da mistura.</i>	75
<i>Tabela 5.7 Resultados da trabalhabilidade das misturas (Ci; TM e MC).</i>	77
<i>Tabela 5.8 Resistências mecânicas à compressão simples das pastas.</i>	78

fluido da suspensão (FONTE: Servais et al., (1999)). 45

Figura 3.10 Fibra de vidro na suspensão de matriz polimérica. Fonte: Yu Chan et al., (1978).

47

Figura 3.11 Ilustração qualitativa sobre o potencial de formação de vazios devido: a) ao contato de superfícies curvas de mesmo diâmetro; b) superfície curva com lisa; c) adição de fibras flexíveis. 48

Figura 3.12 Ilustração qualitativa sobre o potencial das fibras flexíveis em se dobrar e preencher os grandes vazios entre as partículas sólidas. 48

Figura 3.13 Ilustração qualitativa sobre o potencial do efeito parede de fibras com pequenas partículas sólidas da argamassa 49

Figura 4.1 Moinho de facas rotativas utilizado no beneficiamento do resíduo 52

Figura 4.2 Prensa e molde metálico usados para produção da placa de EVA 53

Figura 4.3 Fibras de sisal 56

Figura 4.4 Ilustração dos materiais do Ensaio do Cone de Masrh 58

Figura 4.5 Pontos do ensaio com substituição parcial do cimento Portland por material pozolânico (tijolo moído e metacaulinita). 59

Figura 4.6 Pontos para ensaios de compressão das misturas. 60

Figura 4.7 Moldagem (A) e cura (B) dos corpos-de-prova das misturas analisadas 61

Figura 4.8 Demonstração do equipamento e ensaio do corpo-de-prova 61

Figura 4.9 Ensaio de resistência a tração na flexão. 62

Figura 4.10 (A) alimentação da placa, (B) inclinação de 30°; (c) demonstração do alinhamento das fibras; (D) inclinação de 45°. 64

Figura 4.11 Placas antes (A) e depois do desmolde (B). 65

Figura 4.12 Esquema do ensaio de flexão em três pontos 66

Figura 4.13 Esquema do ensaio de flexão em três pontos na placa e no novo composto. 66

Figura 5.1 Resultado do ensaio de absorção de água dos agregados de EVA. 69

<i>Figura 5.2</i> Ensaio de absorção de água dos agregados de SBR (RIOS, 2008).	69
<i>Figura 5.3</i> Distribuição granulométrica da metacaulinita	72
<i>Figura 5.4</i> Distribuição granulométrica do tijolo moído.	72
<i>Figura 5.5</i> Resultado da análise de difração de Raio-X dos materiais pozolânicos.	74
<i>Figura 5.6</i> Perda de massa do material pozolânico (A) e do cimento puro B).	75
<i>Figura 5.7</i> Reologia das misturas auto-adensáveis.	76
<i>Figura 5.8</i> Gráfico da força X deslocamento da melhor mistura (m 80 10 10; 2,1sp).	80
<i>Figura 5.9</i> Resultados médios dos ensaios das misturas auto-adensáveis com e sem fibras.	81
<i>Figura 5.10</i> Comportamento das fibras alinhadas no compósito de revestimento.	82
<i>Figura 5.11</i> Placas com baixo nível de umidade (A); placas com elevado nível de umidade (B) e placas ideais, com nível médio de umidade (C).	83
<i>Figura 5.12</i> Resultados dos ensaios de flexão da placa de EVA (borracha).	84
<i>Figura 5.13</i> Demonstração do ensaio de resistência à flexão e deformação da placa de EVA produzida	84
<i>Figura 5.14</i> Resultados dos ensaios de flexão da placa de EVA revestida com a matriz sem fibras	85
<i>Figura 5.15</i> Resultados dos ensaios de flexão da placa de EVA revestida com o a matriz com fibras randômicas.	86
<i>Figura 5.16</i> Resultados dos ensaios de flexão da placa de EVA revestida com o compósito de fibras alinhadas.	86
<i>Figura 5.17</i> Resultados médios de todos os compósitos submetidos aos ensaios de tração na flexão	87
<i>Figura 5.18</i> o ensaio de tração à flexão e o comportamento das fibras distribuídas de forma alinhada dentro da pasta matriz.	88

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Apresentação do Tema

Com o crescimento populacional e o aumento do número de indústrias, cresce também a geração de resíduos. Estes resíduos devem ser tratados de forma correta, o que muitas vezes não é feito, trazendo conseqüências nocivas ao meio ambiente.

Essa problemática tem feito com que os regimentos legais aumentem as exigências técnicas quanto à geração, tratamento, transporte e armazenamento do lixo industrial. Por ser, perante a lei, o gerador do resíduo o responsável por ele, existe um custo operacional na gestão dos resíduos para as indústrias. Entretanto, muitas empresas fogem desta obrigação e depositam seus resíduos indiscriminadamente, e muitas vezes clandestinamente, contribuindo para a degradação ambiental. Além do mais, com o passar dos anos, percebe-se que falta espaço para se construir aterros sanitários e isto traz dificuldades para se armazenar um volume crescente de lixo, como têm acontecido nos grandes centros urbanos. A tendência natural é o agravamento dessa situação, o que chama a atenção para o problema: o que fazer e onde colocar tanto lixo?

Dentre as várias formas de processamento e disposição final do lixo, a reciclagem dos resíduos recuperáveis tem sido defendida por entidades ambientalistas e vem obtendo cada vez mais aceitação em todo mundo. O reuso ou recuperação destes resíduos além de ajudar nas questões sanitárias e na preservação das reservas naturais de matérias-primas, elimina custos com armazenamento, proporcionando uma economia para as empresas e para o Estado.

A construção civil tem grande potencial para absorver materiais reciclados das indústrias. Isto se justifica pela necessidade de reduzir os custos das obras, pela abundante variedade de matéria-prima e pelo grande número de materiais diferenciáveis aplicados na construção. Então, o que antes era problema, pode se tornar solução: o resíduo de um setor servindo como matéria-prima apta a ser aplicada em outros setores.

É importante lembrar que a própria reciclagem pode causar impactos ao meio ambiente, como gasto de energia necessário ao processo de transformação; possível geração de resíduos, que podem trazer problemas ainda maiores que aqueles que foram reciclados;



problemas de saúde para operários da indústria recicladora ou para usuários deste novo produto.

A valorização do alternativo como uma opção ao convencional deve possibilitar a geração de um produto com qualidade, estética, produtividade e, o mais importante no aspecto de reciclagem, com potencial de reduzir impactos da poluição ambiental. Para isso, o estudo de viabilidade (técnica, econômica e ambiental) é tarefa de suma relevância na avaliação de cada caso. Do ponto de vista da viabilidade técnica, o novo produto com uso de material reciclado deve satisfazer às solicitações a que estará submetido durante sua utilização. Deve ser funcional para o usuário e com tecnologia simples para ser aplicado, é bem verdade que o usuário é a razão principal para que qualquer produto tenha sucesso. Porém, o novo produto também deve satisfazer às perspectivas dos projetistas e construtores, adequando-se de forma eficaz no processo construtivo e sendo de fácil aplicação.

A visão de construção sustentável deve estar presente em todo o ciclo de vida de um empreendimento, desde sua concepção até sua requalificação, desconstrução ou demolição.

Sob o prisma da sustentabilidade, materiais e resíduos devem ser tratados conjuntamente, pois a correta seleção e utilização de materiais reduzem a geração de resíduos, bem como os impactos por ela ocasionados.

Sabe-se que um plano de ação para o desenvolvimento sustentável passa pela compreensão e criação de novas oportunidades de mercado através de processos inovadores que garantam uma maior eficiência de recursos/energia e uma redução dos custos – o que significa a procura de novas utilizações para os subprodutos das indústrias e para os desperdícios da produção (WBCSD/CSI, 2002).

Os materiais estruturais podem ser divididos em quatro categorias básicas: metais, polímeros, cerâmicos e compósitos.

Os compósitos consistem de dois ou mais materiais diferentes combinados como uma unidade estrutural macroscópica, sendo híbridos ou não. Representam um grande passo na otimização dos materiais, uma vez que estendem as potencialidades dos seus componentes individuais, combinando-os de forma a obter, com materiais tradicionais, produtos com propriedades de engenharia mais avançadas.

Os avanços dos materiais tradicionais e o surgimento de novos materiais, como os polímeros, por exemplo, ampliaram significativamente as possibilidades de desenvolvimento de materiais compósitos. Assim surgiram os compósitos com matriz metálica ou matriz polimérica reforçados com fibras de vidro, carbono ou de aço. Atualmente, eles possuem

várias aplicações nos mais diversos campos da engenharia, notadamente na indústria naval e de aviação.

Na engenharia civil, os compósitos mais empregados são aqueles a base de cimento utilizados sob a forma de concreto com fibras, de argamassa armada (ferrocimento) e de cimento amianto (fibrocimento). Apesar de conhecido há muito tempo, o concreto com fibra representa somente uma pequena porcentagem do concreto produzido no mundo. Já o ferrocimento e o fibrocimento ainda são produzidos essencialmente com fibras de aço e asbesto, respectivamente, apesar da imensa disponibilidade de outras fibras para reforço. Essas limitações aconteceram porque somente nos últimos vinte e cinco anos os princípios relativos à utilização de fibras como reforço de matrizes frágeis (tais como pasta de cimento, argamassa e concreto) começou a ser compreendido. Com a adição de fibras, a fissuração da matriz frágil é reduzida, uma vez que as fissuras são interligadas pelas fibras, e como resultado há um aumento na tenacidade e na resistência à tração e ao impacto. A forma como essas propriedades vão ser modificadas vai depender do tipo de matriz, das propriedades físicas e geométricas das fibras e da interação entre a fibra e a matriz.

Muitos estudos têm sido desenvolvidos sobre o comportamento das fibras de alto módulo, notadamente de aço, havendo na literatura vários modelos que descrevem apropriadamente a resposta desses compósitos a deformações ou tensões solicitantes. Para as fibras naturais, poucos estudos têm sido desenvolvidos sobre o comportamento das mesmas como reforço de matrizes frágeis. Para fibras de sisal e coco, esses estudos se concentram no reforço de matrizes dúcteis, sendo ainda reduzida a quantidade de estudos aprofundados sobre o comportamento mecânico dos materiais compósitos à base de cimento reforçados com essas fibras.

## **1.2 Justificativa**

O estado da Paraíba possui várias empresas que trabalham na produção de calçados e na fabricação de mantas de borrachas que são utilizadas para se obter as palmilhas e solas dos calçados. Utilizam-se copolímeros, com predominância do EVA ou do SBR (látex estireno-butadieno), além de outros polímeros que entram em menores proporções para se obter o composto.

Através de uma pesquisa informal, sabe-se que a produção média de resíduo EVA em uma grande indústria de sandálias instalada no estado da Paraíba é 200t/mês. Considerando a

sua baixa massa unitária, em torno de  $180\text{kg/m}^3$ , tem-se um grande volume gerado desta sobra de borracha sintética, tornando-se cada vez mais difícil encontrar local para se armazenar tal resíduo. Além do mais, dar um destino final de forma que não venha causar danos ao meio ambiente torna-se um desafio, uma vez que a maioria dos depósitos existentes no Brasil é, na verdade, lixão a céu aberto, que não possui área adequada e disponível para se dar um tratamento correto para cada tipo de resíduo distintamente. O resíduo de EVA torna-se um agravante por ser um produto não biodegradável.

No mundo atual, a incorporação de práticas de sustentabilidade na construção tornou-se um imperativo para todos os agentes da sociedade, tais como governos, consumidores, investidores, construtores e associações. De acordo com o Guia de Sustentabilidade na Construção (CIC/FIEMG, 2008), para ser sustentável, qualquer empreendimento humano deve atender, de modo equilibrado, não somente a requisitos de viabilidade econômica, justiça social e aceitação cultural, como também de adequação ambiental.

O uso de adições minerais na construção civil é um importante exemplo de prática sustentável, onde as adições minerais normalmente utilizadas são resíduos provenientes de outras indústrias, os quais seriam descartados em grandes quantidades em locais impróprios, gerando riscos de contaminação do solo e fontes de água (DAL MOLIN, 2005).

A utilização de resíduos minerais nos diversos campos da engenharia traz benefícios ao meio-ambiente, pois representa uma redução da quantidade de material a dispor em aterros ou estocar em pilhas, como também uma diminuição significativa do consumo de recursos naturais primários e não renováveis, como brita, areia, calcário, rocha fosfática e outros. Soma-se a isso a possibilidade de substituir parcialmente o clínquer (calcário calcinado) no processo de fabricação do cimento, reduzindo o consumo energético e as emissões de  $\text{CO}_2$  na atmosfera.

Recentemente, tem-se buscado retomar o uso de tecnologias consagradas e, também, desenvolver novos compósitos utilizando recursos naturais renováveis, com grande incremento no uso das fibras naturais.

A busca por materiais alternativos que possam substituir as fibras de amianto, compondo o fibrocimento, tem-se tornado objeto de estudos recorrentes. As fibras vegetais surgem como opção econômica, salubre e ecologicamente adequada (PICANÇO, 2005).

Estudos demonstram que compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais são adequadas a um grande número de aplicações e seu uso é vantajoso em termos econômicos e ecológicos (VIEIRA et al, 2007).

Muitos pesquisadores defendem o uso de fibras nas argamassas por beneficiar o comportamento pós-fissuração do compósito. Por funcionar, principalmente, como ponte de transferência de tensões, as fibras quando adicionadas à matriz de cimento, podem contribuir no aumento da capacidade resistente, aumento da capacidade de deformação e aumento da tenacidade do compósito. Dessa maneira, a argamassa que apresentava uma fratura frágil pode apresentar uma fratura quase-dúctil.

Dessa maneira, pode-se concluir a real importância e a necessidade da investigação que ora se apresenta, estudando mais profundamente os comportamentos reológicos e mecânicos das argamassas reforçadas com fibras e antes disso, os próprios métodos de avaliação desse comportamento, o que permitirá, num futuro próximo, uma orientação para a produção racionalizada do compósito, dentro de uma visão sistêmica, a fim de que se possa garantir o desempenho desses novos elementos construtivos, integrando-o adequadamente a todos os demais subsistemas.

### **1.3 Objetivo Geral**

Desenvolvimento e avaliação de elementos construtivos leves a partir de matrizes cimentícias com incorporação de resíduos industriais e fibras de sisal.

#### **1.3.1 Objetivos Específicos**

- Estudo de adições pozolânicas em matrizes cimentícias;
- Estudo de fluidez em matrizes auto-adensáveis;
- Avaliação de técnicas de moldagem de compósitos fibrosos;
- Avaliação dos compósitos produzidos.

### **1.4 Estrutura Do Trabalho**

Para o cumprimento do objetivo proposto, a dissertação está estruturada em seis capítulos, sendo este primeiro, relativo à introdução, que contém a importância do estudo, o objetivo que se buscou atingir, a justificativa para a abordagem do tema e a estruturação do trabalho.

No segundo capítulo é apresentado a composição de novos materiais para construção civil, utilizando de materiais não convencionais para uma engenharia sustentável.

No terceiro capítulo é apresentado o estado da arte da influência da adição de fibras e minerais na matriz cimentícia, contemplando definições, importâncias, métodos de avaliação e fatores que influenciam as propriedades.

O quarto capítulo consiste da apresentação das etapas do programa experimental realizado, registrando-se detalhadamente a metodologia utilizada, caracterização dos materiais e apresentação do programa experimental desenvolvido.

A apresentação e discussão dos resultados estão registradas no quinto capítulo, enquanto no sexto são apresentadas as considerações desta dissertação, onde são feitas as reflexões sobre o alcance dos objetivos estabelecidos, a contribuição para a indústria da Construção, bem como a necessidade da continuidade dos trabalhos sobre compósitos utilizando-se de matérias não convencionais.



## CAPÍTULO 2

# NOVOS MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

### 2.0 Construção Sustentável

O conceito de desenvolvimento sustentável diz respeito ao modo de desenvolvimento que tem como alvo o alcance da sustentabilidade. De acordo com o Guia de Sustentabilidade na Construção (CIC/FIEMG, 2008), o desenvolvimento sustentável trata do processo de manutenção do equilíbrio entre a capacidade do ambiente e as demandas por igualdade, prosperidade e qualidade de vida da população humana.

Conforme a definição cunhada em 1987 pela Comissão Mundial sobre Ambiente e Desenvolvimento, o desenvolvimento sustentável é o tipo de desenvolvimento que atende às necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades.

O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, juntamente com a Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura e outras instituições apresentam uma série de princípios básicos da construção sustentável, dentre os quais se destacam:

- Aproveitamento de condições naturais locais.
- Utilizar mínimo de terreno e integrar-se ao ambiente natural.
- Não provocar ou reduzir impactos no entorno.
- Gestão sustentável da implantação da obra.
- Uso de matérias-primas que contribuam com a eco-eficiência do processo.
- Redução do consumo energético.
- Reduzir, reutilizar, reciclar e dispor corretamente os resíduos sólidos.
- Educação ambiental – conscientização dos envolvidos no processo.

Segundo Silva (2007), dentre os aspectos ambientais de sustentabilidade ligados à construção sustentável, referenciados pelos principais sistemas de avaliação de 70

ustentabilidade e certificação voluntária de edifícios – BREEAM (Reino Unido), CASBEE (Japão), GBTool (Internacional) e LEED (Estados Unidos) – destacam-se: gestão do uso da água, gestão do uso de energia, gestão de materiais e resíduos, prevenção de poluição, gestão ambiental, qualidade dos serviços e desempenho econômico.

Podemos perceber que, nos últimos anos, há uma busca cada vez maior por uma evolução da indústria do cimento e do concreto pela via do desenvolvimento sustentável – destacadamente nas áreas de proteção climática (estratégias para mitigar as alterações climáticas), produtividade dos recursos, redução das emissões, inovação e gestão ambiental.

No processo de seleção de materiais e fornecedores adequados com as premissas da sustentabilidade, o Guia de Sustentabilidade na Construção (CIC/FIEMG, 2008) recomenda a adoção de materiais locais, reutilizáveis, recicláveis ou reciclados. Dentre estes, pode-se destacar não somente o cimento Portland composto com escória ou outros produtos minerais reaproveitáveis, como também as adições minerais aplicadas diretamente ao concreto.

## **2.1 Importância das Adições Minerais para o Desenvolvimento Sustentável**

Milhões de toneladas de subprodutos de usinas e indústrias – como fornos de usinas termoelétricas que empregam carvão como combustível e fornos metalúrgicos que produzem ferro fundido, silício metálico e ligas de ferro-silício – são produzidos a cada ano nos países industrializados.

O acúmulo destes subprodutos em aterros representa não só uma perda de material como também uma fonte de graves problemas de poluição ambiental. Seu aproveitamento como agregado para concreto e em subleitos de rodovias é uma alternativa de descarte que não utiliza o potencial destes materiais pozolânicos e cimentantes. Com adequado controle de qualidade, tais subprodutos industriais podem ser incorporados ao concreto, seja na forma de cimentos Portland compostos, seja como adições minerais. Na condição de substituto parcial do cimento Portland no concreto, estes materiais proporcionam uma economia notável de energia e custos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Como substituto parcial do clínquer calcário calcinado na fabricação do cimento, o uso da escória representa uma considerável redução no consumo de energia e nas emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, já que a fabricação do clínquer é baseada na queima de óleo, gás e/ou carvão em altas temperaturas, durante o processo de calcinação.

A redução de poluição gerada na produção de cimentos com adição de escórias e pozolanas é muito significativa, em função da redução das emissões de gás carbônico, considerando que, para cada tonelada de clínquer produzido, uma tonelada de CO<sub>2</sub> é lançada no meio ambiente (DAL MOLIN, 2005).

A energia associada à produção de concretos pode ser consideravelmente reduzida, pois o cimento Portland é o componente que mais requer energia para ser produzido na mistura de concreto, enquanto que os subprodutos pozolânicos e cimentícios provenientes de usinas térmicas e metalúrgicas requerem pouco ou nenhum dispêndio de energia em sua produção. John (1995) apud Dal Molin (2005) afirma que a utilização de escórias e pozolanas permite a produção de cimentos sem a calcinação da matéria-prima, gerando uma redução no consumo energético de até 80%.

Com a incorporação de adições minerais na produção de cimentos e concretos a redução no consumo de energia ocorre não apenas porque esses produtos incorporam grandes quantidades de energia, como também porque as distâncias de transporte de matérias-primas são geralmente reduzidas.

## **2.2 A Reciclagem na Construção Civil**

O setor da construção civil é certamente o maior gerador de resíduos sólidos de toda sociedade. De todos os resíduos sólidos produzidos em centros urbanos de médio e grande porte no Brasil, estatísticas mostram que cerca de 50% a 80% de valores em massa são provenientes de entulhos produzidos da construção civil (Latterza, 2000). Nas cidades brasileiras, a maioria destes resíduos é depositado clandestinamente. Os aterros clandestinos têm obstruído córregos e drenagens, colaborando com as enchentes, favorecendo a proliferação de mosquitos e outros vetores, levando boa parte das prefeituras a gastar grande quantidade de recursos públicos na sua retirada. É comum nos bota-foras e nos locais de deposições irregulares a presença de roedores e insetos (aranhas, escorpiões, mosquito da dengue, etc.).

A construção civil também é responsável por cerca de 15% a 50% do consumo dos recursos naturais extraídos (John, 2005). No Brasil, o consumo de agregados naturais somente na produção de concreto e argamassas é de 220 milhões de toneladas. Em volta das grandes cidades, os agregados naturais começam a ficar escassos, inclusive graças ao crescente controle ambiental sobre a extração das matérias-primas.

Esta realidade tem forçado a construção civil na busca para diminuir o consumo de produtos naturais, diminuir a quantidade de entulho e dar um destino ecologicamente correto a seu resíduo. Atualmente, a construção civil tem desenvolvido um bom potencial para reciclar seus próprios resíduos, graças a evolução de inúmeras pesquisas desenvolvidas nas últimas décadas, que tem comprovado a viabilidade técnica e econômica. Segundo Vazquez (2001), o setor da construção civil tornou-se nessa última década algo primordial na política ambiental.

Para diminuir o desperdício nas obras, além da necessidade de ter-se um projeto rico em detalhes, a indústria da construção civil precisa fazer um melhor planejamento das etapas da obra, ter um maior controle dos serviços, bons cronogramas, aperfeiçoar as ferramentas de trabalho, capacitar a mão-de-obra, elevar o nível educacional dos operários, incentivar a participação dos trabalhadores na produção e investir em pesquisas para melhorar as técnicas executivas. A adoção de sistemas construtivos, por exemplo, com o uso intensivo de pré-fabricados, pode proporcionar uma menor perda de material.

### **2.3 Compósitos Leves com Fibras Naturais**

Faz-se necessário a viabilização novamente do sisal, como alternativa econômica para a região semi-árida do Brasil. O desenvolvimento de tecnologias adequadas que façam melhor aproveitamento da produção e dos seus subprodutos, resultando conseqüentemente num maior retorno econômico, poderá estimular o retorno de uma cultura de grande importância para nossa região (DANTAS, 2000).

Fazendo-se um breve histórico sobre estudos a respeito do uso de fibras naturais como reforço encontrou-se:

Na década de 70 e 80 estudos sobre a utilização de fibras de sisal como reforço de matrizes à base de cimento foram desenvolvidos em vários países sendo que estudos mais sistemáticos sobre a utilização da fibra de sisal iniciaram na Suécia em 1971. Em

1978, SWIF e SMITH (1979) produziram telhas corrugadas. Neste mesmo ano PERSSON & SKARENDAHL (1978) também apresentavam a utilização de concreto com fibra de sisal para utilização em placas de coberturas. Pesquisadores da BRU (Building Research Unit) na Tanzânia desenvolveram em 1978 telhas de 4,5 m auto sustentáveis reforçadas com fibras de sisal (GRAM,1983). Na década de 80, estudos foram desenvolvidos com o intuito de aplicar o concreto fabricado com sisal em construções de baixo custo. Destacam-se os estudos realizados por SWIFT e SMITH (1985), alguns estudos relatados na África, em 1985, e na Tanzânia em 1987, e estudos apresentados pelo Governo do Quênia (UNCHS-HABITAT, 1990). Em 1990, SCHAFER e BRUNSEN (1990) buscaram desenvolver um material estrutural: um sistema de formas para vigas e lajes, de baixo custo, utilizando compósitos de cimento reforçado com fibra de sisal em substituição ao compensado.

No Brasil, os primeiros estudos sobre a aplicação de fibras naturais no concreto foram desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CEPED), na Bahia, com a utilização de fibras de coco, sisal, bambu, piaçava e bagaço de cana-de-açúcar. Foram produzidas vigas e placas de concreto-fibra e fibro-cimento, sendo detectado uma melhor performance da fibra de sisal em comparação com as demais fibras (CEPED, 1982). Os resultados desta pesquisa culminaram, no entanto, com o desenvolvimento de telhas e pias artesanais, sem a qualidade necessária para substituir o cimento amianto. A partir da experiência do CEPED, vários outros centros iniciaram seus estudos sobre o aproveitamento dos materiais vegetais na construção civil, como fibras de coco (GHAVAMI; HOMBEECK, 1982), fibras de sisal (TOLEDO FILHO et al, 1990), e fibras de resíduos vegetais (AGOPYAN, 1989; SAVASTANO et al, 1997).

## **2.4 Fibras Naturais Vegetais**

As fibras de origem vegetal são produzidas abundantemente em muitos países do terceiro mundo, os ditos em desenvolvimento. Requerem na sua maioria um baixo grau de industrialização, tanto no seu processamento quanto no beneficiamento. Comparando-se, em relação ao equivalente em peso ou volume, com as fibras sintéticas usadas no reforço de compósitos – fibras de aço, de vidro, de prolipropileno, etc. - a energia requerida para a sua produção é pequena; assim como os seus custos (DANTAS, 2000).

A incorporação de fibras celulósicas como carga em compósitos poliméricos tem sido cada vez mais empregada na produção de novos materiais. A madeira e os materiais lignocelulósicos possuem muitas características que tornam seu uso vantajoso como: baixo custo, baixa densidade, resistência específica e módulo elevados. Além disso, as fibras celulósicas são atóxicas, abundantes, provêm de fontes renováveis, não são abrasivas, pois não apresentam desgaste dos equipamentos durante o processamento e, podem ser facilmente modificadas por agentes químicos. (REDIGHIERI et al, 2006).

No Brasil, existem vários tipos de culturas que fornecem fibras de ótima qualidade. A ampliação de seus consumos favoreceria a produção dessas, resultando também em uma melhoria sócio-econômica nas regiões produtoras (DANTAS, 2000).

#### 2.4.1 Propriedades das Fibras Naturais Vegetais

As fibras de juta, linho, rami e sisal (convencionais) são fibras com percentuais altos de celulose, sendo indicadas para uso como material de reforço em compósitos. Os percentuais elevados de lignina nas fibras de juta e sisal habilitam-nas a terem comportamento adicional de fortalecimento dos compósitos, principalmente daqueles submetidos a processos de aquecimento. A Tabela 2.1, segundo SANTOS (2006), mostra a composição de algumas fibras celulósicas.

**Tabela 2.1** Composição de Fibras oriundas de cultivo principal e de subprodutos da agricultura.

Fonte de Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Pectina (%)	Cinza (%)	Água (%)
Casca de coco	36 - 43	0,15 - 0,25	20 - 45	3,0	2,7 - 10,2	10
Algodão	82,7	5,7	***	5,7	NA	10
Juta	64,4	12,0	11,8	0,2	NA	10
Linho	64,1	16,7	2,0	1,8	NA	10
Rami	68,6	13,1	0,6	1,9	NA	10
Sisal	65,8	12,0	9,9	0,8	NA	10

FONTE: SANTOS 2006, segundo Reddy & Yang, 2005; Bledzki & Gassan, 1999; Khedari et al., 2005; Toledo Filho et al., 2004, van Dam et al., 2004.

NA: Não avaliado

Segundo SANTOS (2006), as propriedades físicas de uma fibra dependem de sua estrutura química e cada uma tem seu próprio aspecto quando analisada e submetida ao microscópio. As fibras vegetais são bastante heterogêneas, pois dependem do tipo de solo, das condições climáticas, dos fertilizantes utilizados, do tipo de colheita, das folhas, dos frutos ou do caule dos vegetais.

**Tabela 2.2** Propriedades mecânicas de fibras vegetais e de fibras convencionais usadas como reforço

Fibra	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Alongamento(%)	Resistência à tração (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)
Coco	1,2	30,0	175	4,0 - 6,0
Algodão	1,5 - 1,6	7,0 - 8,0	287 - 597	5,5 - 12,
Juta	1,3	1,5 - 1,8	393 - 773	26,5
Linho	1,5	2,7 - 3,2	345 - 1035	27,6
Cânhamo	***	1,6	690	***
Rami	***	3,6 - 3,8	400 - 938	61,4 - 128
Sisal	1,5	2,0 - 2,5	511 - 635	9,4 - 22,0
Krafta	1,5	***	1000	40,0
E-vidrob	2,5	2,5	2000 - 3500	70,0
Carbono (padrão)	1,4	3,3 - 3,7	3000 - 3150	63,0 - 67,0

a – Kraft de madeira leve; b – Fibra de vidro usada na indústria eletrônica (E).

FONTE: BLEDZKI & GASSAN, 1999, citado em SANTOS, 2006.

## 2.5 Fibras de Sisal

A fibra do sisal é uma importante matéria prima nacional utilizada principalmente em cordoaria e artesanato, mas que pode ter seu valor agregado multiplicado se utilizado como reforço de compósitos poliméricos. O sisal é uma fibra ligno-celulósica leve e atóxica, que apresenta resistência específica, custa aproximadamente dez vezes menos que a fibra de vidro e, ao contrário desta fibra inorgânica, causa menos danos por abrasão aos equipamentos e moldes. Entre outras



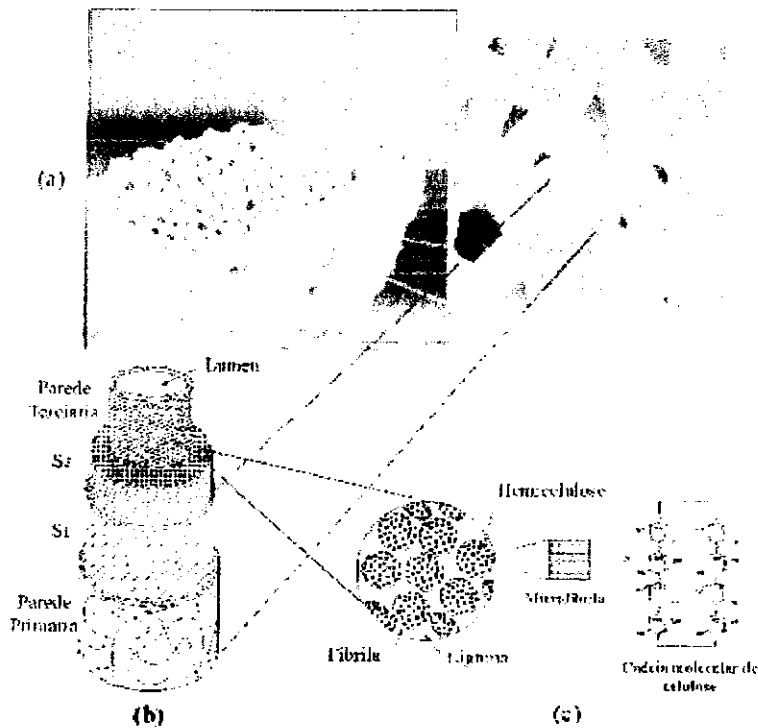
vantagens do sisal podemos apontar a facilidade de modificação superficial, característica das fibras vegetais, sua abundância no Brasil, facilidade de cultivo, o fato de ser um material biodegradável que provem de fonte renovável, além de apresentar boas propriedades como isolante térmico e acústico. Estes fatores, aliados à alta tenacidade, resistência à abrasão e ao baixo custo, tornam o sisal uma das mais estudadas fibras naturais (VIEIRA et al, 2007).

### 2.5.1 Propriedades da fibra de sisal

As fibras de sisal são extraídas das folhas da planta de sisal. A folha de sisal é uma estrutura sanduiche que contém aproximadamente 700-1400 fibras (OKSMAN et al, 2002).

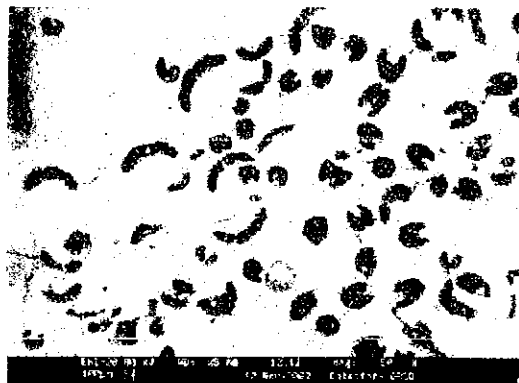
Cada fibra contém ainda numerosas fibrocélulas individuais com cerca de 1-8 mm de comprimento e 6-10  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Cada fibrocélula individual é formada por quatro partes, chamadas parede primária, parede secundária espessa (S1 e S2), parede terciária e lúmen. A morfologia da fibra de sisal pode ser vista na figura 2.1. As fibrocélulas são mantidas unidas por meio da lamela média, que consiste de hemicelulose e lignina. O lúmen varia em tamanho, mas é usualmente bem definido. Cada parede é formada por um conjunto de fibrilas unidas por lignina. Na parede primária a fibrila tem uma estrutura reticulada. Na parede secundária exterior (S1) a fibra é arranjada em espirais que formam um ângulo de  $40^\circ$  com a direção longitudinal da fibra. Na parede secundária interna (S2), a fibrila tem um declive mais acentuado entre  $18^\circ$  e  $25^\circ$ . Fina e mais interna, a parede terciária tem uma estrutura fibrilar paralela e próxima ao lúmen (MWAMILLA, 1987 citado em LIMA, 2004).

As fibrilas são, por sua vez, constituídas de micro-fibrilas com espessura de cerca de 20 nm, compostas de cadeias de moléculas de celulose com espessura de 0,7 nm e comprimento de poucos nm. Essas cadeias são unidas por meio de hemicelulose (GRAM, 1983).



**Figura 2.1** Estrutura de fibra de sisal: a) Micrografia de fibra de sisal; b) desenho esquemático de uma fibrocélula individual; c) estrutura interna de parede da fibra (LIMA, 2004)

Como pode ser observado na micrografia apresentada na figura 1.2, as fibras de sisal não são circulares e nem possuem uma dimensão homogênea. Ou seja, as fibras possuem dimensões e formato variados, dificultando o cálculo do perímetro e área de seção transversal (LIMA, 2004).



**Figura 2.2** Micrografia de argamassa reforçada com fibras curtas de sisal (LIMA, 2004)

Para solucionar este problema, admite-se que a fibra tem formato circular com

um diâmetro médio equivalente.

Apresentam-se a seguir as propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal, após TOLEDO FILHO (1997). A Tabela 2.3 apresenta uma larga faixa de valores, visto que tais propriedades dependem da idade da planta, local do cultivo e condições climáticas. Nessa tabela mostram-se valores para as seguintes propriedades: diâmetro ( $\phi$ ), comprimento ( $l$ ), peso específico ( $\gamma$ ), absorção de água (ABS), resistência à tração ( $f_t$ ), módulo de elasticidade (E) e deformação de ruptura ( $\epsilon_{fu}$ ) das fibras.

**Tabela 2.3** Propriedades físicas e mecânicas das fibras de Sisal.

Origem: Referência	$\phi$ (mm)	$l$ (cm)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	ABS (%)	$f_t$ (Mpa)	E (GPa)	$\epsilon_{fu}$ (%)
Brasil: Ref.: Agopyan, 1990	0,2-0,3		12-13	123-137	374-378		5-5,5
Brasil: Ref.: CEPED, 1982			12,7	240	458	15,2	4,2
Origem: Ref.: Chand, 1988	0,05-0,3		14,5		530-640	9-22	3-7
Índia: Ref.: Mukherjee, 1986	0,1-0,3		14,5		530-630	17-22	4,3
Origem: Ref.: Nilsson, 1975	0,3-0,5	-	-	-	620	-	-
Brasil: Ref.: Tolêdo Filho, 1990	0,08-0,3	38-94	7,5-11	190-250	227-1002	11-27	2,1-4,2

Fonte: TOLEDO FILHO, 1997

## 2.6 Reforço Vegetal Usado no Fibrocimento

Vários tipos de fibras têm sido utilizados como reforço de matrizes frágeis. E, apesar dos problemas existentes de sensibilidade de algumas dessas fibras à alta alcalinidade da matriz, bem como a baixa adesão à matriz de cimento e a instabilidade física e química, vários produtos têm sido fabricados com relativo sucesso.

Além das fibras manufaturadas (acetato de polivinila (PVA), poliéster, polipropileno, fibras de vidro), existe a alternativa de se utilizar reforços de origem

vegetal, incluindo sisal, coco, juta, bambu e celulose, para reforço de matrizes de cimento em elementos de pequena espessura e baixo custo, a serem utilizados em habitações populares nos países em desenvolvimento. Particularmente no Brasil, a variedade e abundância das fibras vegetais existentes tornam atrativas para serem usadas como reforço de matrizes à base de cimento.

Segundo SWAMY(1990), a utilização de fibras vegetais como reforço em compósitos à base de cimento para a construção civil é de grande interesse para os países em desenvolvimento e seria capaz de contribuir para o crescimento de suas infra-estruturas.

Aqui no Brasil, as primeiras pesquisas nesta área foram desenvolvidas no estado da Bahia, em 1980, no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED). As pesquisas realizadas pelo CEPED são consideradas, internacionalmente, como uma das mais amplas e consistentes no seu âmbito, contemplando o desenvolvimento de argamassas reforçadas com fibras de coco, piaçava e sisal. Foram realizados vários experimentos relacionados à influência do teor e comprimento das fibras e aos processos de moldagem; e desenvolvidos e avaliados elementos construtivos pré-fabricados, como telhas, calhas, pias de cozinha, pequenas caixas d'água, moldados através de processos de produção simples e com matrizes de cimento Portland. Com exceção da telha, todos os produtos foram considerados viáveis, técnica e economicamente (SAVASTANO JR, 2000).

Na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) foram desenvolvidos vários trabalhos de pesquisa na área de compósitos fibrosos (mestrado e doutorado). No Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), foram investigados compósitos de pasta de cimento e gesso reforçados com jornal desintegrado, pasta de gesso reforçada com sisal, e argamassas de cimentos especiais reforçadas com fibra de coco. Na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), foram desenvolvidos compósitos à base de cimento com teores elevados (>20% da massa de aglomerante) de resíduos de madeira, de bambu e bagaço de cana-de-açúcar, para uso em construções rurais (BERALDO, 2007). Na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC), a viabilidade da produção de compósitos reforçados com fibra de sisal e coco foi determinada (TOLEDO FILHO, 1997a). Na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG (anteriormente Universidade Federal da Paraíba),

também têm sido desenvolvidas várias pesquisas utilizando fibras de vegetais e matrizes frágeis (FARIAS FILHO, 1999; PADILHA, 2001).

### **2.6.1 Desempenho Mecânico dos Compósitos Cimentícios Fibrosos**

A utilização de fibras como reforço depende basicamente das propriedades da matriz. No caso das matrizes frágeis (pasta de cimento, argamassa ou concreto), objeto desta pesquisa, a maior contribuição da fibra acontece após a fissuração, quando elas formam verdadeiras pontes de ligação entre as regiões fissuradas da matriz. Nesse momento, a carga é transferida para as fibras, que passam a governar o comportamento do compósito em função das suas características, tais como módulo de elasticidade, comprimento, orientação, volume, etc.

Quando a fibra possui módulo de elasticidade e resistência mecânica maiores que os da matriz, por exemplo: fibras de aço, carbono ou vidro, a tensão na qual a matriz fatura pode até ser ligeiramente aumentada. Para compósitos reforçados com fibras de baixo módulo de elasticidade, como as fibras vegetais, a principal função da fibra é incrementar a tenacidade da matriz pela criação de mecanismos de absorção de energia, relacionados ao efeito de escorregamento e arrancamento das fibras, resultando em um material com maior tenacidade e resistência ao impacto. Quando submetidos a esforços de flexão, presentes na maioria das aplicações de engenharia, os materiais compósitos fibrosos podem absorver mais energia e conseqüentemente apresentam maior ductilidade, tenacidade e resistência ao impacto que a matriz de cimento.

A adição de fibras de sisal à argamassa pode reduzir sua resistência à compressão em cerca de 10% a 30% dependendo do tipo, comprimento e fração volumétrica da fibra, bem como do tipo e traço da matriz. Por outro lado, as fibras confinam o material e retardam a propagação da primeira fissura, aumentando a tenacidade pós-carga de pico. O módulo de elasticidade da matriz é ligeiramente reduzido (TOLÊDO FILHO e GHAVAMI, 1996; TOLÊDO FILHO, 1997b).

## **2.7 Substituição Parcial do Cimento Portland por Pozolanas**

Na intenção de construir obras mais duráveis e resistentes, os gregos utilizavam um tufo vulcânico, encontrado na Ilha de Thera, enquanto os romanos se valiam de

outros materiais também de origem piroclástica, encontrados nas vizinhanças da Baía de Nápoles. Como os materiais de melhor qualidade eram obtidos ao redor do monte "Pozzuoli", nas proximidades do Vesúvio, esses materiais receberam a designação de pozolanas. Quando não dispunham de materiais vulcânicos, os romanos empregavam telhas cerâmicas moídas, que segundo registros históricos da época, produziam efeito similar (ZAMPIERI, 1989).

O termo pozolana pode ser usado para todos os materiais silicosos ou silico-aluminosos que não possuem propriedades aglomerantes e que, quando finamente moídos e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (reação pozolânica) formando compostos com propriedades cimentícias.

A importância do hidróxido de cálcio na reação pozolânica está no seu papel de ativador dessa reação. Na matriz endurecida de cimento Portland, o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) é um dos produtos formados na hidratação dos silicatos de cálcio e, quando está dissolvido na água dos poros, confere elevada alcalinidade ao meio, elevando o pH a valores da ordem de 12 a 13.

A capacidade que as pozolanas têm de reagir com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e em misturas com cal e água, é chamada de atividade pozolânica, a qual depende da percentagem de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sendo desejável que elas tenham no mínimo 40% de  $\text{SiO}_2$  e até 30% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e percentuais mínimos de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e de magnésio ( $\text{MgO}$ ). Quanto mais reativa for a pozolana maior será o consumo de hidróxido de cálcio, portanto, maior será sua atividade pozolânica. A atividade pozolânica pode ser determinada de várias maneiras, sendo satisfatória a avaliação da resistência mecânica, uma vez que a análise química não é suficiente para tal fim, embora seja útil no controle qualitativo das pozolanas.

As propriedades de uma pozolana variam em função de sua origem, mineralogia e características físicas. A forma, finura, distribuição do diâmetro das partículas, densidade e composição da pozolana, influenciam as propriedades de uma matriz cimentícia no estado fresco e no desenvolvimento da resistência. A pozolana deve apresentar uma instabilidade ou alteração na sua estrutura cristalina. A sílica e a alumina são reativas quando suas ligações estruturais são fracas ou destruídas por calcinação tornando-as amorfas.

A pozolana utilizada na substituição parcial deve apresentar uma área específica igual ou superior à do cimento Portland. Segundo ZAMPIERI (1989), seria desejável

uma área específica com valores próximos a  $750\text{m}^2/\text{kg}$ , para que a atividade pozolânica fosse alta. Entretanto, isto implica em equipamentos mais sofisticados e maior custo de energia.

Entre os materiais naturais que podem ser utilizados incluem-se: as cinzas vulcânicas, terras diatomáceas e as argilas calcinadas. A metacaulinita obtida pela calcinação, entre  $650^\circ\text{C}$  e  $850^\circ\text{C}$ , de uma argila caulínica (caulim), quando moída até a finura de  $700\text{m}^2/\text{kg}$ , resulta num material de grande pozolanicidade (ZAMPIERI, 1989).

Alguns subprodutos industriais, quando finamente moídos, têm grande potencialidade, dentre eles: escória de alto forno, microssílica, resíduos cerâmicos e cinza da casca de arroz.

A importância desta substituição para os compósitos fibrosos deriva principalmente de dois aspectos da reação pozolânica:

- 1) a reação consome hidróxido de cálcio, reduzindo a mineralização e o ataque alcalino, contribuindo significativamente para a durabilidade da fibra vegetal e do compósito;
- 2) os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares maiores, reduzindo o tamanho dos poros dos cimentos pozolânicos hidratados e melhorando assim a interface fibra-matriz e a impermeabilidade do sistema.

Ainda podem ser citadas duas contribuições na utilização de pozolanas em substituição ao cimento Portland. A primeira é o impacto no custo final do compósito. Através do uso de materiais pozolânicos pode-se prever uma maior economia, pois esses materiais permitem uma redução no consumo final de energia, sendo mais barato que o clínquer de cimento Portland. A outra diz respeito ao benefício ao meio-ambiente, pois o uso de pozolanas reduz significativamente a emissão de gases na atmosfera, e recicla resíduos geralmente depositados a céu aberto, como nos casos dos resíduos cerâmicos, escória de alto forno, cinza da casca de arroz, e outros.



## 2.8 O Aproveitamento de Resíduos Industriais nas Matrizes Cimentícias

O resíduo industrial é de responsabilidade do seu gerador e este deve exercer um processo de gestão do resíduo de forma eficaz, garantindo o cumprimento das normas legais e técnicas existentes. Segundo PEDRO (2002), os projetos arquitetônicos das indústrias devem ser elaborados de forma que dêem condições técnicas para que os resíduos sejam tratados e depositados no local onde foram gerados. Como geralmente isto não ocorre, surge a necessidade de depositar os resíduos em locais externos às fábricas e quase sempre distantes da origem. Esta solução faz surgir o arriscado e dispendioso transporte, no qual, o transportador e o destinatário final são co-responsáveis no processo de administração dos rejeitos.

Quando o resíduo passa por algum processo de descaracterização, como no caso da incineração, da reciclagem e do reuso, isto tira a responsabilidade do gerador original perante esse novo produto logo depois de completado o processo. Neste caso, o adquirente é o novo responsável, salvo os casos em que o resíduo, objeto de reciclagem ou reuso, esteja contaminado de origem, quando a responsabilidade permanece sendo do gerador.

O surgimento de novas leis ambientais, aplicando severas multas, e o aumento da fiscalização pelos órgãos competentes, têm forçosamente aumentado o número dos adeptos do “ecologicamente correto” (GARLET, 1998).

Além da obrigação de cumprir as leis, percebe-se uma maior preocupação com uma gestão ambiental mais eficaz e a implementação de programas de qualidade, que assumem um papel diferenciador no mercado, pois as empresas tidas como “limpas” ou “ecologicamente corretas” são preferidas pelo consumidor. Ou seja, o próprio mercado está enfatizando a idéia da redução, reciclagem e reutilização (3R) de resíduos em contraposição à simples otimização dos sistemas de descarte, que apenas protefam a solução do problema de agressão ambiental.

JOHN (2000) aponta como principal benefício da reciclagem a contribuição à preservação dos recursos naturais, pois ao se utilizar resíduos no processo industrial, evitam-se maiores destruições ao meio ambiente, como os causados pela extração de matéria-prima. Segundo esse autor, a construção civil é responsável por grande parte do consumo dos recursos naturais extraídos.

No Brasil, o consumo anual de agregados naturais destinados à produção de concreto e argamassas é de 220 milhões de toneladas. Em volta das grandes cidades, as jazidas de agregados naturais começam a desaparecer, inclusive graças ao crescente controle ambiental sobre a extração das matérias-primas. Esta realidade tem forçado o setor da construção civil a diminuir o consumo de produtos naturais, diminuir a quantidade de entulho e tratar corretamente seus resíduos (JOHN, 2000).

Entretanto, ÂNGULO et al. (2001) consideram ainda pouco expressiva a reciclagem de resíduos no Brasil para utilização como materiais de construção, quando comparado aos países desenvolvidos. Abrindo duas exceções para os casos das indústrias de cimento e de aço no Brasil.

Portanto, a construção civil tem grande potencial para absorver resíduos das indústrias, justificado pela necessidade de reduzir os custos de produção e pela variedade de matéria-prima dos diferentes produtos aplicados na construção civil, e o que antes era um problema pode tornar-se uma solução: o resíduo de um setor servindo como matéria-prima a ser aplicada em outro.

### **2.8.1 Resíduos da Indústria Cerâmica**

No estado da Paraíba a produção industrial de cerâmica vermelha está em crescimento. E, em virtude de falhas no processo de produção e manuseio, a quantidade de rejeitos também é crescente e considerável. Estes rejeitos são constituídos de restos de blocos e telhas quebrados durante e após a queima, quando transportados ou manuseados dentro da própria indústria, ou de peças defeituosas impossibilitadas de serem comercializadas. Na cidade de Santa Rita-PB, por exemplo, a geração de resíduos na produção de blocos cerâmicos de quatro das principais indústrias consultadas gira em torno de 120t/mês, sendo estimada em 2%, segundo os responsáveis pela produção.

Em geral, os resíduos cerâmicos são considerados como entulho e lançados a céu aberto, causando danos ao meio ambiente, ou utilizados como aterro, desperdiçando o grande potencial pozolânico desse resíduo (Figura 2.3). Entretanto, esses resíduos apresentam grande quantidade de sílica e alumina na forma não cristalina, possibilitando o seu aproveitamento como material pozolânico, dependendo das suas características físico-químicas e do grau de moagem empregado. No presente estudo foram utilizados

resíduos de blocos cerâmicos calcinados, provenientes de uma indústria cerâmica do estado da Paraíba, sendo finamente moídos em laboratório.



**Figura 2.3** Resíduos de blocos cerâmicos lançados no meio-ambiente (Santa Rita-PB).

### **2.8.2 Resíduos da indústria de calçados**

A indústria de calçados é caracterizada pela constante busca de novos materiais para fabricação de seus produtos. Dentre esses novos materiais destaca-se o copolímero EVA (etileno acetato de vinila), cuja obtenção ocorreu pela primeira vez em 1938, e só na década de 70 foi utilizado na produção de sandálias de praia. Atualmente, o EVA é uma das mais importantes matérias-primas na indústria de calçados, sendo aplicado na produção de chapas, reticuladas e expandidas, usadas para confecção de palmilhas, solados, entressolas e enchimento, os quais são componentes utilizados na fabricação dos mais diversos tipos de calçados, tais como: tênis, sandálias, sapatos, etc.

Os resíduos de EVA são gerados durante os processos de fabricação das placas de borracha expandidas e dos calçados. Esses resíduos são em forma de aparas, resultantes do corte das peças, e em forma de pó. Os resíduos em pó surgem durante o acabamento das peças e são os mais facilmente aproveitados pelas indústrias, podendo servir como cargas de volta ao processo de fabricação das placas (GARLET, 1998). Já para os demais tipos de resíduos, o processo de reciclagem é lento e existe a limitação quanto à quantidade de resíduo que se pode incorporar ao processo, sem comprometer a qualidade do produto. Portanto, o volume de resíduo reaproveitado na própria indústria é bem menor que o volume por ela gerado, não mais que 40% (BEZERRA, 2002).

O crescente volume desses resíduos tem-se tornado um grande problema para as indústrias na hora de dar-lhes um destino final. A deposição em aterros sanitários de resíduos sintéticos representa sérias implicações, devido à baixa velocidade de degradação e a possibilidade de provocar severas contaminações ao meio ambiente. A incineração também não é recomendada devido à geração de gases tóxicos. A estocagem em galpões é possível (Figura 2.4), porém o grande volume de resíduo produzido exige uma grande capacidade de armazenamento, onerando os custos fixos da indústria.



**Figura 2.4** Resíduos de EVA estocados em galpão (BEZERRA, 2002)

Em uma grande indústria de sandálias instalada no estado da Paraíba, por exemplo, a produção média estimada de resíduo EVA é de 200t/mês. Considerando o alto volume gerado em virtude da sua baixa massa unitária ( $\sim 1000\text{m}^3/\text{mês}$ ) e que o mesmo não é biodegradável, encontrar um local para se armazenar tal resíduo sem causar danos ao meio ambiente torna-se um desafio (BEZERRA, 2002).

Segundo COLLEPARDI (1999), as indústrias cimenteiras aproveitam o potencial energético deste e de outros resíduos, também ricos em enxofre, para alimentar seus fornos rotativos na fabricação do clínquer. Isto tem aumentado o teor de sulfatos na produção do clínquer dos cimentos Portland. A deterioração dos concretos estruturais tem crescido nos últimos tempos e uma das causas é a formação retardada de produtos expansivos (etringita secundária) no concreto endurecido, que está diretamente

relacionada a esse aumento do teor de sulfatos nos aglomerantes e na microestrutura dos concretos de cimento Portland.

O aproveitamento de resíduos de EVA no setor da construção civil tem despertado grande interesse. Os compósitos leves obtidos a partir de agregados de EVA podem servir nas seguintes aplicações: enchimento para lajes rebaixadas, isolamento acústico entre pavimentos, isolamento térmico nas lajes de forro, elementos pré-fabricados, etc. Isto evidencia a grande potencialidade para uso desse resíduo em diversos componentes e sistemas na construção civil, sem função estrutural. Segundo GARLET (1998), em ensaio de combustibilidade de agregados de EVA, não houve propagação da chama e, nos ensaios de suscetibilidade ao ataque por fungos, as amostras de agregado de EVA foram resistentes à colonização por fungos, não sendo necessário tratamento fungicida para a sua utilização.

As questões ambientais levantadas e os poucos trabalhos sobre reciclagem de resíduos da indústria de calçados na construção civil, estimulam o surgimento de novos estudos que avaliem as possibilidades técnicas de produzir elementos construtivos com aproveitamento desses resíduos. Esta pesquisa utiliza resíduos de EVA da indústria de calçados, reciclando-os como agregado leve na confecção de compósitos leves com e sem fibras de sisal, bem como a sua utilização em conjunto com o resíduo moído de blocos cerâmicos substituindo parcialmente o cimento Portland.

## 2.9 Materiais Leves

Dentre os vários materiais considerados leves para a construção civil, destacam-se:

1) amianto - embora esteja sendo proibido na maioria dos países, ainda se vê pedreiros e construtores pedindo aos donos da obra para comprar "amianto" para isolar tubulações de água quente. O amianto é uma fibra natural (de origem mineral), que se mistura extremamente bem com cimento, e isola muito bem. Mas é cancerígeno, e por isso tem sido banido. Foi comum ver, nos países desenvolvidos, edifícios inteiros serem condenados por terem amianto na isolação. Apenas por curiosidade, o amianto é cancerígeno, pois suas fibras (nem todas, mas as de tamanho médio) entram no organismo pela respiração, alojando-se em definitivo nos pulmões, sem possibilidade de eliminação. Provocam asbestose (perda de capacidade respiratória) e câncer, além de

outras variações nada desejáveis. Portanto, por qualquer que seja a questão, evite. Mesmo porque existem opções tão ou mais eficientes, e inertes quanto ao item saúde.

2) placas de isopor - leves, práticas, e encontradas até em papelarias. O isopor é leve, como se sabe, mas tem suas limitações. Perde em eficiência de isolamento para outros materiais, deforma bastante (seja por ação mecânica, seja por ação térmica - contrai e dilata conforme o calor que se aproxima), e absorve água (e quando a absorve, adensando a capacidade isolante)

3) placas de poliestireno expandido - apresentadas em várias densidades e formatos, lisas ou corrugadas, são mais caras mas superam o isopor comum em eficiência de isolamento, resistência à deformação, ganham de goleada no quesito absorção de água

4) poliuretano expandido - espumas de poliuretano - assemelham-se às placas de poliestireno, mas moldam-se conforme o espaço existente, pois podem ser aplicadas por spray.

5) lã de vidro - nada mais do que um "colchão" de fibras de vidro adequadamente entrelaçadas. Precisa ter sua espessura e densidade consideradas no cálculo, mas precisam ser protegidas da umidade e da água. Caso a fibra absorva água, a eficiência se vai.

6) silicato de cálcio - mais usado na isolamento de tubulações de água quente ou sistemas de refrigeração, tem boa eficiência e precisa ser protegido da umidade e água

7) vermiculita expandida - muito usada na isolamento de saunas e estufas, é leve, barata e se mistura relativamente bem com cimento argila expandida - muito usada como agregado leve em lajes, agrega a eficiência isolante dos materiais cerâmicos

## 2.10 O Concreto Leve

A massa unitária dos concretos normais é em torno de  $2400\text{kg/m}^3$ . Portanto, as estruturas de concreto precisam ser dimensionadas para suportar cargas que são em grande parte devido ao seu próprio peso.

O concreto leve, como o nome diz, apresenta-se com menor massa unitária e, portanto, menor peso próprio, que varia de  $300\text{kg/m}^3$  a  $1800\text{kg/m}^3$ . Sua resistência à compressão varia desde  $0,3\text{MPa}$  à  $70\text{MPa}$ . O grande intervalo dessas grandezas é



devido a grande variedade de métodos e materiais aplicados na obtenção deste tipo de concreto (Neville, 1997).

Consegue-se reduzir a massa unitária do concreto substituindo parte dos materiais sólidos que o compõem por ar. Esta alteração faz com que este concreto apresente características próprias e, portanto, aplicações específicas que justifiquem seu uso.

Spratt (1960) apud Garlet (1998) relata o uso de concreto leve no Couliseu, na cúpula de Pantheon com 44m de diâmetro e outras edificações de 2000 anos atrás. Porém, somente no século passado aconteceram avanços significativos no uso de concreto leve. Bremner (1998) cita, como exemplo, o grande sucesso da construção do navio USS Selma, em 1919, feito com concreto leve.

Atualmente, esse tipo de concreto está sendo utilizado com sucesso em diversas áreas da construção civil, com aprovação pelos códigos e normas públicas internacionais.

#### **2.10.1 Vantagens no uso de concreto leve**

Por possuir massa unitária significativamente inferior à dos concretos convencionais, o concreto leve proporciona às edificações alguns vantagens , como por exemplo (Neville, 1997):

1. alívio de carga na estrutura;
2. alívio de carga nas fundações;
3. aumento da produtividade;
4. redução no consumo de fôrmas;
5. diminuição no consumo de ferragem;
6. ajuda na preservação do meio ambiente.

#### **2.10.2 Limitações no uso de concretos leves**

Existem algumas limitações no uso de concretos leves, como por exemplo (Neville, 1997):

1. Possui grande absorção de água;



2. dificuldade de se controlar a relação água/cimento na mistura;
3. na maioria das vezes, utiliza-se maior teor de cimento, comparado aos concretos normais;
4. em geral possui resistência menor que os concretos convencionais.

## 2.11 Classificação dos concretos leves

O ACI 213R-87 divide os tipos de concretos leves de acordo com sua aplicação, através da massa específica (Neville, 1997):

**Tabela 2.4** Tipos de concretos leves.

<b>Tipos de concretos</b>	<b>Massa unitária (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência Mínima (MPa)</b>
Concretos leve estrutural	1350 - 1900	17
Concreto de resistência média	800 - 1350	7 - 17
Concreto de baixa massa unitária	300 - 800	7

## 2.12 Tipos de concretos leves

Os concretos leves podem ser obtidos através de três métodos distintos de produção (Short & Kinniburgh, 1967 apud Garlet, 1998):

- concreto com agregados leves: usa-se agregado oco, celular ou poroso, obtido geralmente através de incorporação de ar nas suas partículas, havendo substituição do agregado graúdo natural por agregado leve;
- concreto sem finos: caracteriza o concreto que não utiliza o agregado miúdo;
- concreto celular, aerado ou concreto gás: trata-se do concreto que contém vazios formados através da introdução de grandes quantidades de gases no interior da pasta de cimento.

### 2.12.1 Concreto com agregados leves

Este tipo de concreto é obtido com o uso de agregados leves graúdos (granulometria geralmente entre 5 e 19mm) em misturas com agregado miúdo normal (Spratt, 1960 apud Garlet, 1998).

Segundo este mesmo autor, a massa unitária do concreto com agregados leves é função da granulometria do agregado, do teor de umidade, do traço e do grau de compactação do concreto. Conforme seu valor, têm-se as seguintes utilizações desse tipo de concreto, em função da sua massa unitária:

1. entre 300 a 800kg/m<sup>3</sup>: utilizado geralmente para fins de isolamento térmico;
2. entre 800 a 1350kg/m<sup>3</sup>: utilizado principalmente como elementos de vedação;
3. acima de 1350kg/m<sup>3</sup>: utilizado para fins estruturais.

#### 2.12.2 Tipos de agregados leves

- **Agregados naturais:**

São na sua maioria de origem vulcânica, como por exemplo: as cinzas vulcânicas e as pedras pomes. Esses agregados são encontrados em apenas alguns locais do mundo e por isso não são muito utilizados (Neville, 1997).

- **Agregados obtidos de processo industrial:**

São agregados que passam por algum tipo de transformação que causa expansão, reduzindo assim sua massa específica aparente. Podem utilizar-se de matéria-prima natural beneficiada (argila, vermiculita, ardósia, folhelho, perlita, etc) ou de subprodutos industrializados (cinza volante, escória de alto forno, resíduos de minas de carvão, etc) (Sobral, 1996). Segundo Neville (1997), devido o processo industrial, estes agregados apresentam-se geralmente mais uniformes do que os agregados naturais.

#### 2.13 Concreto sem finos

Este tipo de concreto é constituído somente por aglomerante, agregado graúdo e água. Portanto, o agregado miúdo não faz parte de sua composição, o que o caracteriza por apresentar grandes vazios e, conseqüentemente, possuir baixas resistências.

Este tipo de concreto tem sido utilizado principalmente em muros, painéis de enchimento, estruturas de drenagem e sub-base em estacionamentos domésticos.

Apresenta resistência à compressão geralmente entre 1,5MPa e 14MPa, dependendo da massa unitária que, por sua vez, está relacionada ao teor de cimento e à granulometria do agregado (McIntosh et al., 1956 apud Neville, 1997).

Possui pouquíssima coesão, portanto, deve-se ter o cuidado para esperar o tempo necessário para que o material torne-se firme o suficiente para se fazer a desforma. Outro cuidado é com a cura, devido à pequena espessura da pasta de cimento (Malhotra, 1976 apud Neville, 1997).

Este mesmo autor afirma que a resistência à tração na flexão dos concretos sem finos é geralmente 30% da resistência à compressão, portanto, relativamente maior que a do concreto normal.

#### **2.14 Concreto celular**

É o concreto em que se introduz vazios no interior da pasta de cimento ou da argamassa endurecida. Neste tipo de concreto, não há agregado graúdo, portanto muitos autores criticam o uso do termo concreto para estes. Também pode não conter nenhum tipo de agregado, por exemplo, quando aplicado como isolante térmico.

Os vazios no concreto podem ser obtidos através de ar ou gás. O ar pode ser injetado mecanicamente dentro da massa (SENAI, 1976 apud Garlet, 1998) ou produzida pela adição de espuma pré-fabricada. O gás é obtido através de reações químicas que ocorrem durante o estado líquido ou plástico da massa. Normalmente utiliza-se como agente o pó de alumínio (Neville, 1997).

Apresenta resistência à compressão geralmente entre 3MPa e 6MPa que é função da massa unitária do concreto. Sua principal propriedade, que justifica sua aplicação, é a alta capacidade de isolamento térmico (SENAI, 1976 apud Garlet, 1998). É um concreto que sofre grande retração e possui alta permeabilidade, entre  $10^{-6}$  m/s e  $10^{-10}$  m/s (Neville, 1997).

Segundo este mesmo autor, as principais aplicações deste concreto são: elementos isolantes térmicos, blocos de alvenaria de vedação, forro e preenchimento de valas.

## CAPÍTULO 3

### PROPRIEDADES DA ARGAMASSA COM FIBRAS

#### 3.0 Argamassa

Chama-se argamassa à mistura feita com pelo menos um aglomerante, agregados miúdos e água. O aglomerante pode ser a cal, o cimento ou o gesso. O agregado mais comum é a areia, embora possa ser utilizado o pó de pedra.

As argamassas são empregadas com as seguintes finalidades:

- assentar tijolos e blocos, azulejos, ladrilhos, cerâmicas e tacos de madeira;
- Impermeabilizar superfícies;
- regularizar (tapar buracos, eliminar ondulações, nivelar e aprumar) paredes, pisos e tetos;
- dar acabamento às superfícies (liso, áspero, rugoso, texturizado, etc.).

As argamassas mais comuns são constituídas por cimento, areia e água. Em alguns casos, costuma-se adicionar outro material como cal, saibro, barro, caulim, e outros para a obtenção de propriedades especiais. Chama-se proporção a proporção em volume ou em massa entre os componentes das argamassas, que varia de acordo com a finalidade e as características desejadas.

Assim como o concreto, as argamassas também se apresentam em estado plástico nas primeiras horas de confecção, e endurecem com o tempo, ganhando resistência, resiliência e durabilidade. Este processo chama-se cura da argamassa.

#### 3.1 Características Reológicas

Para que o revestimento de argamassa cumpra suas funções, é necessário que atenda a determinados requisitos de desempenho, os quais foram amplamente discutidos por Sabbatini; Barros (1990), e compreendem a capacidade de aderência ao substrato, a resistência mecânica, a integridade física, as características superficiais, a capacidade de absorver deformações intrínsecas e extrínsecas, a estanqueidade e a durabilidade.

Por outro lado, há fatores relativos à produção do revestimento que são fundamentais para que estes atendam os requisitos definidos, notadamente, as características da argamassa, as condições do substrato, as condições climáticas durante a produção e as características de aplicação incluindo-se aqui a habilidade da mão-de-obra e os equipamentos empregados (SABBATINI; BARROS, 1990). Destes fatores, neste trabalho, dá-se enfoque para a argamassa, a qual deverá apresentar características e propriedades compatíveis com as exigências que se faz para o revestimento.

São muitas as propriedades exigidas de uma argamassa para revestimento; mas, na essência, diz-se que ela precisa ser “aplicável”, ou seja, precisa ser “trabalhável”. Observa-se que esta definição é descritiva, fundamentada em aspectos de natureza tátil-visual e, por isso mesmo, difícil de ser mensurada, uma vez que pode ser avaliada de maneira distinta por diferentes aplicadores do revestimento.

Se o que se deseja é melhorar as condições de produção do revestimento, por este quadro fica claro que existe uma necessidade premente de se transformar esses termos qualitativos em parâmetros mensuráveis, que possam ser mais precisamente referenciados às condições de aplicação.

Neste contexto, tem sido intensa a busca por procedimentos que permitam avaliar mais precisamente as características de aplicabilidade da argamassa de revestimento, tendo-se chegado, muito recentemente, à aplicação dos conceitos de reologia, os quais serão aqui apresentados e discutidos.

### **3.1.1 A importância da Reologia de Argamassa**

Entendida como a ciência que tem sido utilizada para estudar a deformação e o fluxo de materiais quando submetidos a uma determinada tensão ou sollicitação mecânica externa (WATANABE et al., 1989 apud OLIVEIRA et al., 2000), a reologia tem contribuído significativamente para entender a relação entre a morfologia de sistemas multifase e o potencial desempenho de produtos.

Particularmente no caso dos revestimentos de argamassa, entender e dominar a reologia das argamassas é fundamental, pois no processo de execução do revestimento, grande parte das atividades realizadas depende das características das argamassas no seu estado fresco, como as destacadas a seguir:

- para uma homogeneização dos constituintes da argamassa, cada técnica de mistura utilizada (manual ou mecânica, misturador de eixo horizontal ou inclinado, por exemplo), exige uma reologia adequada, haja vista a diferença da magnitude da taxa de cisalhamento entre as partículas internas, do volume de argamassa e do tempo utilizados em cada uma das técnicas mencionadas;
- as características de aplicação da argamassa na superfície do substrato (manual ou mecânica; baixa ou alta energia) requer em uma determinada reologia da argamassa, a fim de que: quando em contato com a superfície, favoreça uma área de contato maior e contínua, evitando concentração de efeitos (como bolhas de ar) na interface entre a camada de argamassa e o substrato; possa auxiliar na quantidade e na espécie química de elementos transportados para os poros do substrato; tenha coesão suficiente que evite a sua reflexão;
- no momento do espalhamento, associado ao aperto da argamassa contra o substrato, é necessário que a argamassa tenha uma reologia que lhe permita ser cisalhada, de modo a facilitar o seu espalhamento e seu maior contato com o substrato;

Todas estas características são exigidas de qualquer que seja a argamassa para revestimento. Assim, uma argamassa com ou sem fibras deverá ser aplicável e deverá ter potencial de gerar um revestimento que atenda os requisitos de desempenho que lhe foram atribuídos em projeto.

### **3.1.2 Parâmetros Reológicos**

Considerando-se a argamassa como uma suspensão reativa e concentrada, dois parâmetros são essenciais para a avaliação do seu comportamento reológico: “tensão de escoamento” e “viscosidade”.

A tensão de escoamento é definida como sendo “a tensão mínima de cisalhamento para que o escoamento da suspensão se inicie”, e é governada pelo tipo e quantidade de contato (devido ao atrito) entre os grãos; enquanto a viscosidade é definida como sendo “a resistência que o fluido oferece ao escoamento”, e está

diretamente associada com a distancia entre os sólidos existentes na matriz (DE LARRAD, 1999).

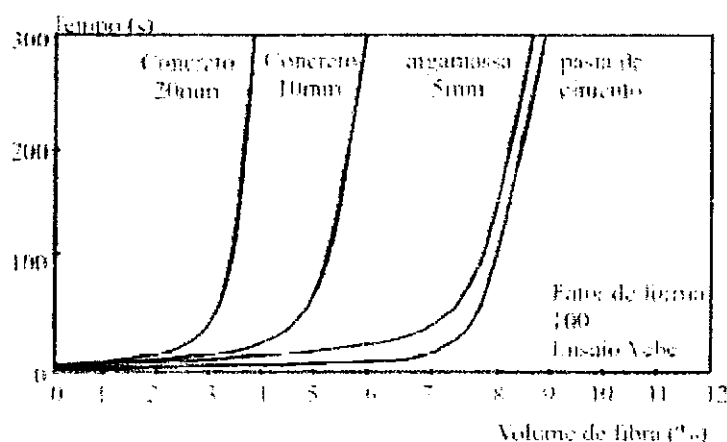
Suas medidas são resultantes da aplicação de tensões de cisalhamento na suspensão, em função da magnitude da taxa de cisalhamento, e muitas vezes são expressas por modelos matemáticos.

## 3.2 Fatores que Afetam os Parâmetros Reológicos

### 3.2.1 Influência da matriz

Dois fatores relacionados à matriz são fundamentais para a alteração do comportamento reológico do compósito: o tamanho do agregado e a sua concentração (fração volumétrica).

Para verificar a influência do tamanho do agregado na concentração máxima de fibras, apresentam-se, na Figura 3.1, os resultados da investigação de Edgington et al., citado por Grunewald (2004). Quatro matrizes foram produzidas, sendo uma delas uma pasta de cimento e as demais, variou-se somente o tamanho dos agregados: 20, 10, 5 mm. Para cada matriz, foi adicionado um tipo de fibra de aço, de um único fator de forma (100).

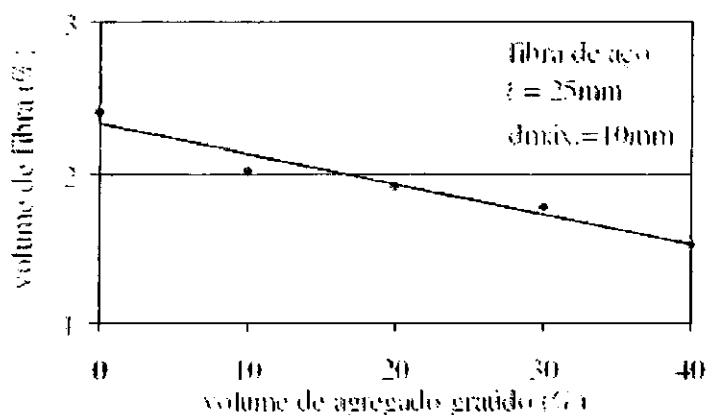


**Figura 3.1** Efeito do tamanho do agregado na concentração máxima de fibras de aço. Fonte: Grunewald (2004).

Observa-se que a quantidade de fibra possível de ser adicionada sem prejuízo da reologia é em função do tamanho do agregado. Para o agregado de maior dimensão, os valores do tempo de VeBe se elevam com pouca quantidade de fibras adicionadas. A partir da redução da dimensão do agregado, somente verifica-se um aumento do tempo de VeBe em altas concentrações de fibras.



Para verificar a influência da concentração de agregado na concentração máxima de fibras possível de ser empregada, Grunewald (2004) cita o trabalho de Swamy; Mangat, que investigaram o efeito do agregado graúdo na fração volumétrica de fibras de aço, conforme ilustra a Figura 3.2. Utilizando fibras de aço com comprimento ( $l$ ) de 25 mm e diâmetro máximo do agregado ( $d_{máx.}$ ) de 10mm, os autores determinaram a proporção direta da redução do volume de fibra possível de ser incorporada à mistura, a partir do aumento da concentração do agregado.

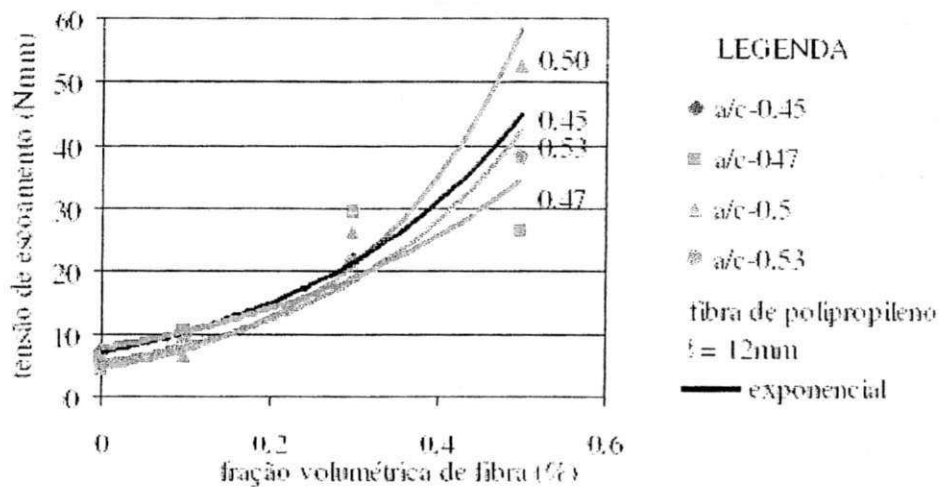


**Figura 3.2** Efeito da quantidade de agregado graúdo na fração volumétrica de fibras de aço. Fonte: Swamy; Mangat citado por Grunewald (2004).

Observa-se aqui que a diminuição da quantidade de pasta, gerada pelo aumento do volume de agregado, influenciou muito na quantidade de fibra incorporada. E, dos parâmetros que abordam o comportamento reológico, a concentração de agregado tem uma influência maior no parâmetro viscosidade do que na tensão de escoamento, conforme o trabalho de Ponikiewski; Szwabowski (2005).

Utilizando o reômetro rotacional Viskomat, e a equação de Bingham, os autores investigaram argamassa de cimento, areia e superplastificante, reforçada com fibras de polipropileno, carbono, vidro e aço, e verificaram que a relação água/cimento tem uma influência maior no parâmetro viscosidade do que na tensão de escoamento, com exceção da fibra de aço que influencia nos dois parâmetros.

Os valores de viscosidade não foram expressos pelos autores no artigo que o autor teve acesso; somente, os valores de tensão de escoamento foram apresentados, conforme a ilustração da Figura 3.3 a qual demonstra valores de tensão de escoamento com pequena diferença somente na fração volumétrica de fibra de 0,5% (os autores não especificam em relação a que a porcentagem se refere), o que permite concluir que, há pouca influência da quantidade de pasta na incorporação de fibras, desde que em pequenas quantidades: até 0,5%.

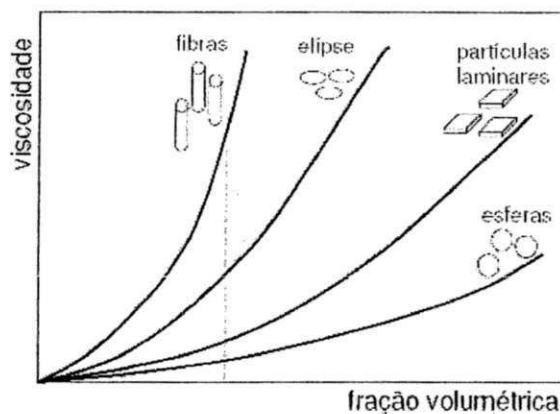


**Figura 3.3** Relação entre a fração volumétrica da fibra de polipropileno e a tensão de escoamento. Fonte: Ponikiewski; Szwabowski (2005).

### 3.2.2 Influência da Fibra

A adição de fibras em uma suspensão de matriz cimentícia concentrada, como é o caso das argamassas, contribuirá para o aumento da tensão de escoamento e da viscosidade. Esta afirmativa é corroborada pelos trabalhos de autores que estudaram a reologia em suspensões de fibras em matriz polimérica como Ericson, et al. (1997); Gibson; Toll (1999), Petrich, et al., (2000) e Servais et al. (2002), os quais enfatizam o surgimento de uma tensão de escoamento em suspensões de fibras no regime concentrado que não existiam em suspensões de regimes diluídos e semi-diluídos.

Rohn, 2008, por sua vez, ao apresentar a ilustração da Figura 3.4, salienta que, independentemente da fração volumétrica, a fibra tem mais impacto na viscosidade do que qualquer outra geometria de partícula.



**Figura 3.4** Efeito do formato da partícula na viscosidade. FONTE: Rohn, 2008.

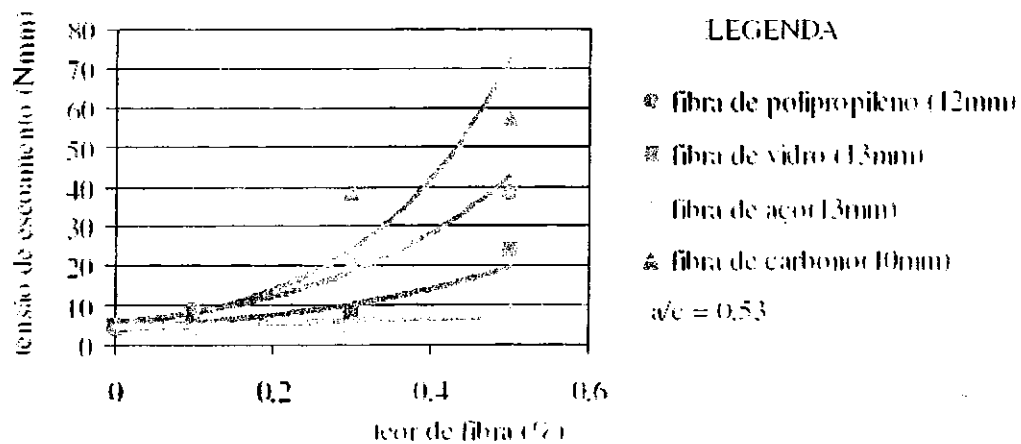
O efeito da fibra nos dois parâmetros, tensão de escoamento e viscosidade, está relacionado principalmente a três razões, as quais estão intimamente relacionadas:

- o formato das fibras é mais alongado do que o do agregado, logo sua área superficial, no mesmo volume, é mais elevada (GRUNEWALD, 2004);
- a concentração e a aleatoriedade das fibras contribuem para diferentes e grandes quantidades de contato entre as partículas sólidas, seja com o grão de cimento, agregado ou com a própria fibra (SERVAIS et al., 2000);
- as fibras rígidas têm o potencial de modificar o arranjo estrutural da granulométrica dos grãos da matriz, sendo uma barreira à sua movimentação; enquanto as fibras flexíveis tem o potencial de se dobrar, preenchendo o espaço entre os grãos, ou entrelaçando os grãos (GRUNEWALD, 2004).

Três fatores relacionados à fibra são fundamentais para a alteração do comportamento reológico do compósito: o tipo de material de que é produzido a fibra, o seu comprimento e sua fração volumétrica.

O tipo de material de que é produzida a fibra pode governar a quantidade máxima possível de fibras no compósito devido, principalmente, a dois parâmetros intrínsecos: característica da superfície das fibras e suas propriedades mecânicas. No que se refere à superfície, existe a possibilidade da fibra ser hidrófoba ou hidrofílica, o que muda completamente o seu comportamento no compósito e altera, por consequência, as características deste. No que se refere à propriedade mecânica, a fibra pode ser rígida ou flexível o que também irá alterar as características do compósito.

Dentre os poucos trabalhos que compara o comportamento reológico de compósitos com diferentes tipos de fibras, tem-se o de Ponikiewski; Szwabowski (2005), que apresenta os valores de tensão de escoamento (Figura 3.5) de compósitos produzidos com argamassa de cimento, areia e superplastificante, com relação água/cimento 0,53 e comprimento de fibras variando entre 10 a 13 mm, em função do material empregado. Nesta pesquisa, somente o tipo de material da fibra foi considerado como uma variável.



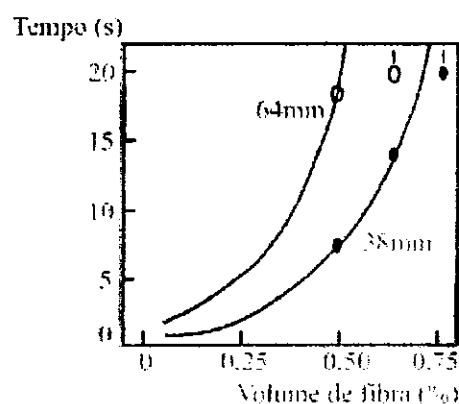
**Figura 3.5** Efeito do tipo de material da fibra no valor da tensão de escoamento.

Fonte: Ponikiewski; Szwabowski (2005).

Dentre as fibras investigadas pelo autor, percebe-se que todas tiveram comportamento de tensão de escoamento distintos e, considerando que as fibras de polipropileno e carbono são hidrofóbicas e de vidro e aço são hidrofílicas, com os resultados apresentados pelos autores Ponikiewski; Szwabowski (2005), é possível concluir que as fibras de caráter hidrofóbicas possuem valores de tensão de escoamento maiores que as fibras de caráter hidrofílicas.

Ou seja, para suspensões de fibras hidrofílicas é possível que se inicie seu escoamento com tensões iniciais mais baixas do que para as suspensões de fibras hidrofóbicas. O que pode inferir que o escorregamento das fibras hidrofílicas na suspensão é melhor do que as fibras hidrofóbicas.

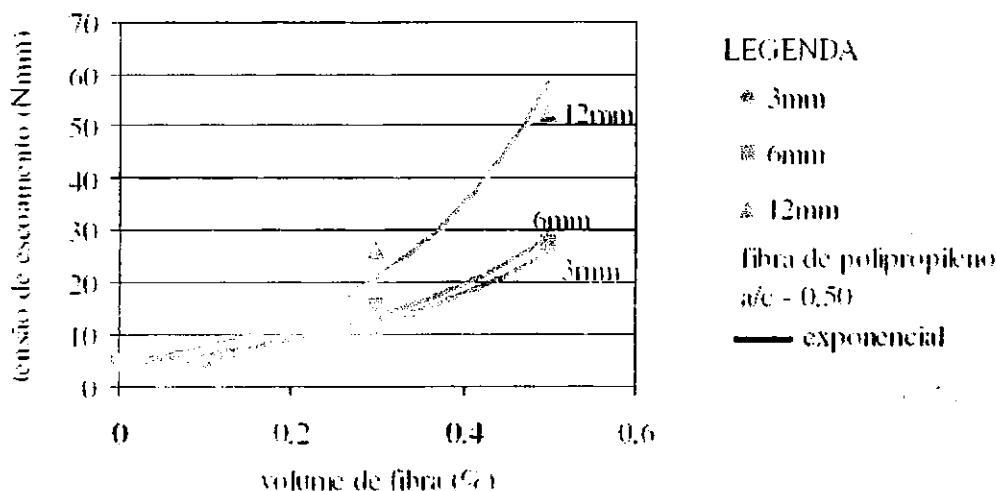
Para verificar a influência do comprimento da fibra na concentração máxima de fibras, apresentam-se os resultados da investigação de Johnston (1995) e Ponikiewski; Szwabowski (2005). O primeiro autor investigou o comportamento do concreto reforçado com fibras de polipropileno no seu estado fresco. Utilizando o ensaio VeBe e fibras de 38 mm e 64 mm, o autor obteve os resultados apresentados na Figura 3.6.



**Figura 3.6** Efeito do comprimento e do teor de fibra no comportamento do estado fresco de concreto, a partir do ensaio VeBe. Fonte: Johnston (1995).

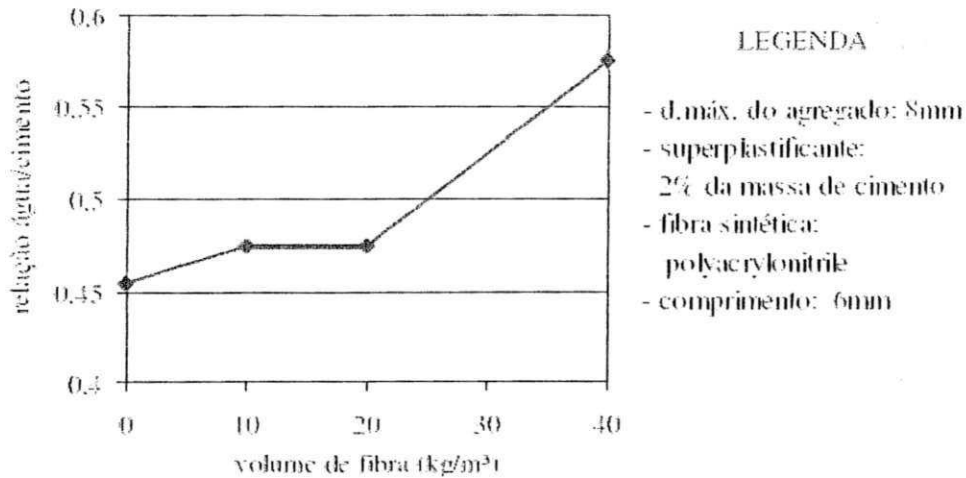
Observa-se que utilizando uma fração volumétrica de 0,50% (o autor não define em relação a que a porcentagem se refere), o aumento de 38mm para 64mm favorece o aumento de 3 vezes do tempo de VeBe.

Investigando argamassa reforçada com fibras, Ponikiewski; Szwabowski (2005) notaram que existe um determinado comprimento da fibra que começa a afetar o valor da tensão de escoamento. Observando-se a Figura 3.7, percebe-se que os valores de tensão de escoamento da argamassa (de cimento, areia em superplastificante) reforçada com fibras de polipropileno de comprimento 3 mm são iguais quando comparados com os valores encontrados nas argamassas com fibras de comprimento 6mm; no entanto, este valor aumenta significativamente, mesmo para baixo teores de fibras, quando se aumenta o comprimento para 12 mm.



**Figura 3.7.** Efeito do comprimento e da fração volumétrica da fibra, na tensão de escoamento de argamassas. Fonte: Ponikiewski; Szwabowski (2005).

A fração volumétrica da fibra é o último fator citado que pode influenciar no comportamento do compósito no seu estado fresco. Worner; Tehen (1995) comentam que as fibras sintéticas do tipo polyacrylonitrile adsorvem água da matriz devido a sua elevada área superficial. Em vista disso, os autores verificaram que mantendo constante a “trabalhabilidade” do compósito, a relação água/cimento aumentava ao passo que aumentava o volume de fibras. Porém, ao utilizar superplastificante, os autores conseguiram adicionar fibras em até o teor de 20kg/m<sup>3</sup> (ver Figura 3.8), mantendo aproximadamente constata a relação água/cimento – 0,45. Somente ocorre o aumento bastante significativo da relação água/cimento, quando se adicionada o teor de fibras de 40kg/m<sup>3</sup>, passando-se de 0,45 para 0,57.



**Figura 3.8.** Relação entre água/cimento e volume de fibra. Fonte: Worner; Tehen (1995).

Desse contexto pôde-se observar que o comportamento do compósito de matriz cimentícia é influenciado pela composição dessa matriz e pelas características e dosagem das fibras. Cada compósito apresenta uma característica própria que precisa ser investigada minuciosamente por métodos de ensaios, os quais devem permitir avaliar adequadamente o comportamento reológico deste compósito. Além disso, observa-se que pouco estudo se tem sobre o comportamento da argamassa com fibras, pois apesar da exaustiva pesquisa bibliográfica feita, poucos foram as referências encontradas para subsidiar a organização deste item.

### 3.2.3 Influência do Aditivo

Aditivos são as substâncias que são adicionadas intencionalmente ao concreto, com o fim de reforçar ou melhorar certas características, inclusive facilitando seu preparo e utilização (PETRUCCI, 1995).

Segundo a norma NBR 12655:2006 da ABNT, aditivos são materiais adicionados ao concreto durante o processo de mistura em uma quantidade não superior aos 5% sobre a massa do cimento contido no concreto, para modificar as propriedades da mistura no estado fresco e/ou no estado endurecido. Os aditivos mais usuais são os seguintes:

- Tenso-ativos (plastificantes, superplastificantes, redutores de água);
- Incorporadores de ar;
- Aceleradores de pega;

- Retardadores de pega;
- Impermeabilizantes;
- Fungicidas, germicidas e inseticidas;
- Inibidores de corrosão de armaduras.

### 3.2.4 Aditivos Superplastificantes

Dentre as principais finalidades do emprego dos aditivos no concreto, podemos destacar as seguintes ações: melhorar a trabalhabilidade; acelerar a pega; retardar a pega; acelerar o endurecimento nas idades iniciais; aumentar tensões nas primeiras idades, aumentar resistência gelo x degelo; diminuir a permeabilidade aos líquidos; diminuir a retração; diminuir o calor de hidratação; impedir segregação e sedimentação em caldas; criar expansão; aumentar aderência do agregado aos cimentos; produzir concretos coloridos; produzir concreto leve; produzir propriedades fungicidas, germicidas e inseticidas; inibir corrosão das armaduras e ajudar no bombeamento e elevação mecânica.

Segundo Andrade e Helene (2007), a utilização de concretos de maior resistência e durabilidade se tornou possível com o surgimento dos aditivos superplastificantes, que permitem a obtenção de concretos plásticos com a redução da relação água/cimento. O uso desses aditivos provoca mudanças na reologia da pasta, tornando-a mais fluida, pois dispersa as partículas de cimento e faz com que menos água seja necessária para se atingir uma dada trabalhabilidade.

Os superplastificantes permitiram também o emprego de pozolanas de alta reatividade – como o metacaulim e a sílica ativa – para a produção de concretos de alto desempenho, que têm como função melhorar o desempenho mecânico e reduzir a porosidade das pastas, produzindo concretos com maior durabilidade.

O efeito dos superplastificantes é influenciado, fundamentalmente, por três fenômenos de natureza físico-química (dispersão, adsorção e potencial de repulsão intermolecular zeta) que resultam na desfloculação e dispersão das partículas de cimento, conferindo-lhes uma forte carga elétrica negativa de modo a repeli-las umas das outras.

Em geral, a quantidade de superplastificante a incluir numa composição de betão é determinada experimentalmente por intermédio de ensaios em pastas (cimento, água e superplastificante), realizados com o objectivo de determinar a quantidade de superplastificante responsável pela obtenção de uma fluidez máxima da pasta para uma

dada relação água/ligante. É, assim, assumido que as características da pasta controlam as propriedades reológicas do betão fresco e que este procedimento assegura que o betão correspondente, constituído por uma pasta semelhante e uma determinada quantidade de agregados, apresenta uma trabalhabilidade máxima. A única variável presente neste processo é a relação superplastificante/cimento e é determinada com recurso a ensaios simples e práticos, como o ensaio do cone de Marsh ou o mini-abaxamento.

### 3.2.4 Materiais Pozolânicos

O material pozolânico, de acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 1992) e a ASTM C 618 (1978), é definido como um material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, a temperaturas ambientes, para formar compostos com propriedades cimentantes. Quanto à sua origem, os materiais pozolânicos são classificados pela NBR 12653 em pozolanas naturais e pozolanas artificiais.

Entretanto, existem divergências entre quanto esta classificação, principalmente quanto à natureza de argilas calcinadas. Alguns autores, como MONTANHEIRO et al (2002a) e ABNT (1992d), classificam como pozolanas naturais todas as rochas portadoras de atividade pozolânica natural. Por outro lado, MEHTA (1987) também considera como pozolanas naturais os produtos da calcinação dessas rochas.

As pozolanas naturais são materiais que procedem de rochas vulcânicas e cinzas vulcânicas, geralmente de carácter petrográfico ácido, isto é, ricos em sílica ( $\geq 65\%$   $37 \text{ SiO}_2$ ) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica. Para serem empregados, esses materiais em geral passam pelos processos de britagem, moagem, classificação por tamanho e, em alguns casos, ativação, após os quais adquirem uma maior e mais ativa superfície específica.

Os materiais pozolânicos podem se dividir em:

- Superpozolanas: sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz predominantemente amorfa.



- Pozolanas comuns: cinza volante com baixo teor de cálcio, argilas calcinadas, cinzas vulcânicas.
- Pozolanas pouco reativas: escórias de alto-forno resfriadas lentamente, cinza de casca de arroz predominantemente cristalina.

#### **3.2.4.1 Metacaulim**

O metacaulim é originado da calcinação do rejeito do beneficiamento do caulim, sendo um subproduto sílico-aluminoso proveniente da calcinação de argilas cauliniticas entre 600°C e 900°C. Após este tratamento térmico, que é precedido pela lavagem da argila caulinitica para remoção de impurezas não reativas, forma-se a partir dos argilominerais um componente amorfo e de grande instabilidade química – a metacaulinita – que é responsável pela atividade pozolânica. O processo de produção é rigorosamente controlado, razão pela qual se obtém um produto de alta pureza e reatividade.

Segundo Dal Molin (2005), convencionou-se chamar o metacaulim proveniente de argilas extremamente finas – com elevados teores de caulinita – de metacaulim de alta reatividade (MCAR). O MCAR também pode ser obtido através do tratamento do resíduo da indústria produtora de cobertura de papel.

Na definição de Helene et al. (2003) apud Tavares (2008), o metacaulim é um produto constituído principalmente por compostos à base de sílica e alumina na fase vítrea (amorfa), proporcionando alta reatividade com o hidróxido de cálcio presente no concreto, sendo recomendado para uso indiscriminado em concretos de cimento Portland.

Rocha (2005) cita que a alta reatividade do metacaulim se explica por sua reação química com o hidróxido de cálcio livre presente na pasta de cimento, associada à sua finura, que produz o efeito de micro-preenchimento de poros da mistura.

#### **3.2.4.2 Resíduo de tijolo moído**

Foi possível verificar, ao longo do tempo, que o uso de resíduos de tijolo como constituinte de argamassas de cal aérea tem viabilidade e apresenta vantagens a vários níveis. Verificou-se que, em proporções adequadas de cal, pó e/ou grãos de tijolo e areia, as argamassas com resíduos de cerâmica de barro vermelho podem registrar um bom desempenho como argamassas de substituição para rebocos (RODRIGUES, 2004).

Da análise de EDS dos elementos químicos presentes, pode concluir-se que existe uma porção considerável de Silício e Alumínio, o que pode indicar a forte presença de Sílica e Alumina nas amostras. Este fator pode levar a crer que o material tem características pozolânicas, quando aplicado em granulométrica muito fina. As quantidades de Carbono e Oxigênio podem ser afetadas pelo método de análise, ou seja, na ausência de revestimento da amostra, pode ter ocorrido combustão em algumas zonas da mesma, dando origem a um elevado teor de Carbono, e não sendo submetida a um pré tratamento adequado, a amostra pode surgir com um elevado teor de Oxigênio (RODRIGUES, 2004)..

Ainda, segundo Rodrigues (2004), a pozolanicidade é essencialmente condicionada pelo estado dos constituintes do material. No estado cristalino, os minerais constituintes dos resíduos de tijolo serão pouco ou nada reativos em termos pozolânicos, mesmo contendo Sílica e Alumina. Sendo este fator limitado, sobretudo, pela temperatura de cozedura dos tijolos, apesar de existir a informação de que os tijolos foram cozidos a cerca de 800°C (dentro dos limites considerados ideais), é necessário aferir o estado real dos minerais, para melhor compreensão da pozolanicidade do material, sua caracterização e otimização.

### **3.2.5 Microestrutura do Compósito**

A microestrutura do compósito fresco, quando em repouso, é caracterizada por um arranjo estrutural formado por água, grãos de cimento, agregados de diversas naturezas e fibras. Este arranjo interno é imediatamente desestruturado quando se aplica uma carga. De acordo com Milliken; Powell (1994), o comportamento de escoamento da suspensão quando deformada, é resultado da transformação desse arranjo inicial.

Durante a deformação do compósito, ocorrem movimentações da parte fluida e da parte sólida, favorecendo as interações entre as partículas sólidas, modifica-se, assim, todo arranjo estrutural inicial. Estas interações são aqui denominadas de fenômenos internos, que contribuem para explicar o comportamento reológico dos compósitos.

Partículas sólidas separadas favorecem a redução da quantidade e da intensidade desses contatos, resultando na movimentação do fluxo sem grandes perdas de energia. Antunes (2005) e Oliveira et al., (2000), dentre outros autores, comentam formas de evitar esses contatos, sendo a presença de matriz a principal delas.

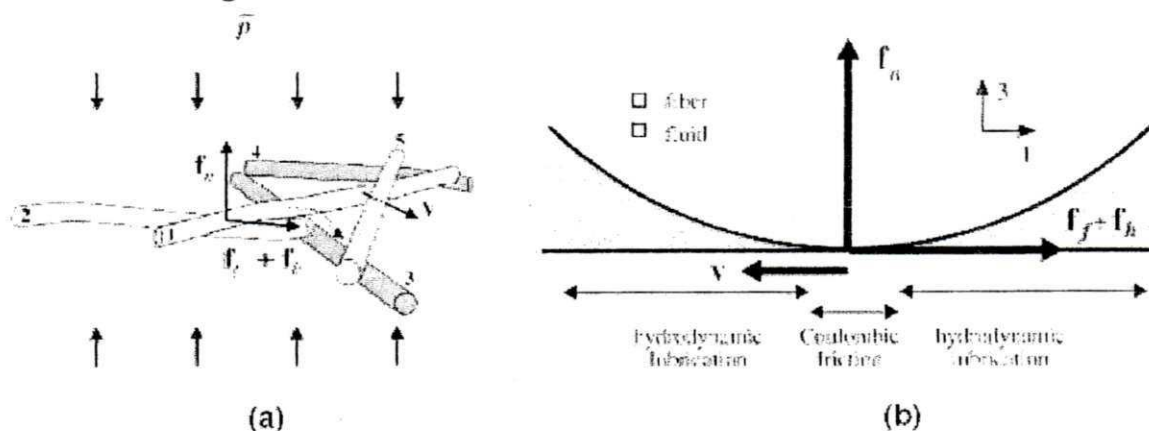
Entretanto, quando não se têm opções para distanciar as partículas, os contatos são inevitáveis, e um aumento de energia é necessário para vencer o atrito entre as partículas. O tipo e o número dessas interações são fenômenos que favorecem o aumento da tensão de escoamento e da viscosidade do compósito. Em relação ao tipo de contato é possível que se tenha a interação fibra-fibra e a fibra-agregado, além, ainda da interação agregado-agregado.

Um outro fenômeno que ocorre na microestrutura do compósito de matriz cimentícia é o empacotamento das partículas. Quando adicionadas em uma suspensão altamente concentrada de partículas sólidas, as fibras afetam consideravelmente o empacotamento das partículas e, segundo De Larrad (1999), esta alteração reflete nas propriedades reológicas do compósito.

### 3.2.6 Interação fibra-fibra e fibra-agregado

Autores como Sundararajakumar; Koch (1997), Ericsson et al., (1997) e Petrich et al., (2000), reconhecem que no sistema concentrado de fibras, em matriz polimérica, a sua assimetria, o seu tamanho e sua aleatoriedade são fatores fundamentais para atuação de forças hidrodinâmicas e contatos mecânicos.

Os autores propõem que em cada ponto de contato entre as fibras, atuam três forças distintas: força normal ( $f_n$ ), força de fricção ( $f_f$ ) e força de lubrificação ( $f_h$ ). A presença dessas forças é função da taxa de cisalhamento e da força externa de cisalhamento ( $p$ ) aplicada na suspensão de fibra. Suas orientações e posições estão ilustradas na Figura 3.9.



**Figura 3.9** Esquema das posições das forças de interação entre as fibras: (a) concentração de fibras em suspensão submetidas a uma força externa de cisalhamento (FONTE: Servais et al., (2002)); (b) detalhe da interação - secção transversal da fibra interagindo com o meio fluido da suspensão (FONTE: Servais et al., (1999)).

Antunes (2005) comenta que em soluções concentradas, o contato e o deslizamento entre partículas podem gerar atrito. Entre fibras e agregado, este atrito também pode ser favorecido pelo entrelaçamento do agregado pelas fibras, o que pode acontecer somente em fibras flexíveis adicionadas na matriz de agregado, uma vez que seu potencial de se dobrar contribui para tal fenômeno.

Dessa forma, se o comprimento da fibra for maior que diâmetro do agregado, e seu módulo de elasticidade for consideravelmente baixo, maior será a probabilidade desse fenômeno ocorrer, fazendo com que o movimento do grão no meio fluido seja dificultado.

### **3.2.7 Empacotamento das Partículas**

Segundo Oliveira et al., (2000), o índice de empacotamento de uma suspensão de sólidos é definido como o volume realmente ocupado pelas partículas sólidas em relação ao volume total do sistema, podendo ser calculado pela seguinte relação (Grunewald (2004):

$$\text{Empacotamento} = \frac{\text{massa do sólido/volume do recipiente}}{\text{massa específica do sólido}}$$

Quando se tem uma estrutura com alto índice de empacotamento, significa a existência de uma quantidade pequena de vazios; portanto uma baixa porosidade do compósito. Em contrapartida, um valor baixo do índice de empacotamento representa uma elevada quantidade de vazios na estrutura granular.

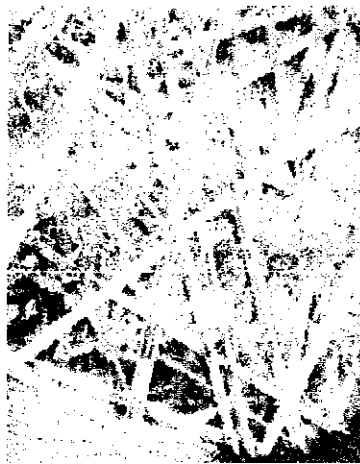
#### **3.2.7.1 Interação fibra com fibra**

Quando fibras são adicionadas em argamassas, a interação fibra com fibra raramente acontece, porque o seu volume é muito pequeno quando comparado com o volume do agregado. Mas, quando fibras não são dispersas adequadamente na matriz durante a mistura, resultam na matriz como que “emaranhados de um novelo de lã”, resultando na existência desse tipo de interação.

Toll (1998) apud Servais et al., (2002) afirma que o máximo índice de

empacotamento ( $f_{m\acute{a}x}$ ) de suspensões de fibras é proporcional ao número de fibras vizinhas ( $n_f$ ), e inversamente proporcional ao fator de forma ( $l/d$ ) e à distribuição orientacional da fibra ( $D.O_f$ ).

Para ilustrar esse tipo de arranjo estrutural, apresenta-se, na Figura 3.10, uma micrografia da estrutura interna de uma suspensão de fibra de matriz polimérica.



**Figura 3.10** Fibra de vidro na suspensão de matriz polimérica. Fonte: Yu Chan et al., (1978).

Observa-se que o formato das fibras distribuídas aleatoriamente no espaço é incapaz de proporcionar o seu empacotamento. Vale salientar que as fibras ilustradas são fibras de vidro, com módulo de elasticidade próximo a 75GPa. Fibras que possuem um módulo de elasticidade menor que este (fibras flexíveis), como, por exemplo, fibras de sisal, têm o potencial de se dobrar, e esta dobra faz com que ocorra a redução de vazios, fazendo com que a quantidade de vazios das fibras rígidas sejam maiores que das fibras flexíveis.

### 3.2.7.2 Interação do agregado com fibra

A adição de fibras em suspensões de partículas esféricas (argamassa, por exemplo) pode alterar o índice de empacotamento devido às suas distintas geometrias. Conforme De Larrad (1999), quando a fibra é curta o suficiente para permanecer nos vazios criados entre as esferas, este pode contribuir com o empacotamento da suspensão, sem criar nenhuma perturbação no fator de empacotamento.

Quando a fibra tem um comprimento maior que o vazio criado entre as esferas, a porosidade pode ocorrer devido ao contato da superfície curva (partícula esférica) com a superfície plana (fibra). Este cenário pode ser observado na representação ilustrativa da Figura 3.11(a) e (b), que demonstra o potencial do fenômeno, mas não traduz toda