

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são descritos os princípios sob os quais esta dissertação está fundamentada. Assim, houve necessidade de tomar conhecimento sobre o comportamento mecânico e microestrutural de compósitos reforçados por fibras, e como a forma de fabricação dos mesmos interferiria neste comportamento. Os conceitos da mecânica da fratura foram discutidos para analisar as deformações e tensões na presença de descontinuidades.

2.1. Retrospectiva do uso de compósitos reforçados por fibras

O conceito de reforço com fibras nos materiais de construção não é algo novo. As fibras têm sido aplicadas em construções desde o início da história do homem; havendo evidências que fibras de asbesto foram usadas para reforçar postes de argila há 5 mil anos. Outros exemplos se referem a tijolos de adobe reforçados com fibras vegetais na Babilônia e Pérsia, pêlos de animais utilizados como reforço em argamassa de enchimento de paredes, tijolos de barro produzidos pelos egípcios com argila cozida e reforçados com palha. Entretanto, a adição de fibras para reforço do concreto é uma técnica de construção relativamente nova. O emprego de fibras descontínuas adicionadas ao concreto desenvolveu-se a partir de 1960, quando surgiram no mercado novos produtos tais como fibras metálicas, minerais e de vidro.

No Brasil, a utilização de fibras vegetais com a finalidade de reforço de matrizes começou na PUC-Rio em 1979, onde foram realizados estudos com fibras de coco reforçando argamassa de cimento. O interesse pelo uso das fibras naturais como reforço está vinculado ao seu baixo custo, disponibilidade e por questões ambientais e econômicas, já que os materiais tradicionais de construção apresentam um custo bastante elevado, explicado pelo alto consumo de energia e transporte.

A respeito das vantagens apresentadas anteriormente, deve-se levar em consideração, o fato que a adição das fibras à pasta (argamassa, concreto) terá uma influência importante nas características físicas e mecânicas do compósito produzido.

Matrizes com características frágeis, tais como argamassa de cimento, necessitam de melhorias de suas propriedades com vistas às condições de serviço às quais estão sujeitas. A adição de fibras neste tipo de matriz melhora consideravelmente as propriedades de tração e flexão o que no caso particular do cimento significa uma alteração das propriedades reológicas da mistura fresca, um controle da fissuração do concreto e uma mudança do seu comportamento à fratura conferindo maior capacidade de carregamento após o aparecimento das primeiras trincas (Hannant, 1978).

De uma forma geral, as propriedades finais do compósito são fortemente influenciadas pelas características individuais de seus componentes e pelo método de fabricação do compósito, conforme os fatores a seguir:

- ✓ Tipo de fibras;
- ✓ Condição de uso das fibras;
- ✓ Arranjo e distribuição das fibras;
- ✓ Forma e geometria das fibras;
- ✓ Grau de aderência entre fibra e matriz;
- ✓ Fração volumétrica das fibras;
- ✓ Propriedades das fibras;
- ✓ Superfície das fibras;
- ✓ Processo de mistura;
- ✓ Método de cura.

Vários trabalhos documentados na literatura especializada (Guimarães, 1982, Ryder, 1975), apresentam resultados interessantes no que concerne à utilização de fibras vegetais em matrizes de cimento. As fibras, em quantidades adequadas, modificam as características da matriz frágil e, de acordo com os fatores anteriormente mencionados podem promover:

- ✓ Acréscimo na resistência à tração e flexão;
- ✓ Acréscimo na resistência ao impacto;

- ✓ Controle de fissuração e mudança de comportamento na ruptura, conferindo aumento na capacidade de carregamento após a fissuração da matriz.

No entanto, essas melhorias são, geralmente, acompanhadas por diminuição na resistência à compressão. Quando bem controlada, essa queda na resistência à compressão pode não comprometer o desempenho do compósito em serviço.

2.2. Compósitos reforçados com polpas celulósicas

Quando se fala em polpas celulósicas, entendem-se fibras curtas (micro fibras), isto é, seu comportamento quando adicionadas em matrizes como reforço, é caracterizado pela randomicidade da sua orientação. Quanto à dispersão das fibras em matrizes cimentícias, relatam-se dois processos, o primeiro se refere à maneira tradicional de confecção de pastas, e o segundo o método Hatschek (Akers & Studinka, 1989), também utilizado na fabricação de fibrocimento.

Pela maneira tradicional, a trabalhabilidade da pasta é afetada pela adição das polpas da mesma forma que essa trabalhabilidade é afetada por fibras naturais, tais como sisal, fibras de coco e fibras de bananeira. Uma vez que as fibras absorvem a água de amassamento dificultando o manuseio e adensamento da massa.

Já pelo processo de Hatschek, descrito por Dos Anjos (2002) e utilizado nesta dissertação, obtém-se uma pasta através de um “licor”, não havendo problemas de trabalhabilidade e adensamento. Além disso, os produtos produzidos por este processo apresentam melhor qualidade em termos de desempenho mecânico, principalmente quanto à resistência à flexão e ductilidade. Porém este método acarreta um significativo aumento de custo de produção (Swamy, 1990).

2.2.1. Processos de polpação

A madeira ou fibras vegetais são formadas por camadas, ligadas entre si por forças interfibrilares e pela lignina que age como ligante. Para a separação dessas fibras, é necessário despende uma certa quantidade de energia. A qualidade, as características e as utilizações da pasta produzida serão funções da quantidade de energia aplicada. Deste modo, pode-se definir o processo de polpação como sendo o processo de separação das fibras mediante a utilização de energia química e/ou mecânica (Phillip, 1998).

O processo Kraft utiliza como agente destruidor da madeira uma solução alcalina de hidróxido de sódio e de sulfeto de sódio que atua a quente e sob pressão. Daí também se dizer que a solução é de cozedura da madeira. O processo Kraft permite a utilização de todos os tipos de madeira e gera fibras branqueáveis e fortes (Phillip, 1998).

O rendimento do processo Kraft está entre 50% e 65% (Phillip, 1999). Assim, quase toda a lignina é removida, o que é importante para a utilização das polpas na construção civil, já que a matriz cimentícia é altamente alcalina e poderá atacar as células das fibras das polpas.

O processo de refinamento da polpa é bastante complexo e de grande extensão para ser definido completamente, visto que são vários os fatores que influenciam no processo. Este processo também tem grande influência nas propriedades das fibras quando usadas como reforço de matrizes frágeis na construção civil, devido à alteração no comprimento médio das fibras antes e após o refino e ao processo de fibrilação interna e externa que ocorre. O processo de refino aumenta acentuadamente a superfície específica das fibras, além de produzir finos. Então o refino da polpa faz com que se tenha um maior número de fibras por unidade volumétrica da matriz, o que pode contribuir favoravelmente à tenacidade.

2.2.2. Microestrutura

A madeira é um composto natural que exibe uma combinação notável de resistência, rigidez e flexibilidade. Estudos detalhados mostram uma original arquitetura hierárquica sob a qual os constituintes da madeira são arranjados, permitindo obter excelentes propriedades. Além da madeira, o bambu também apresenta uma estrutura do gradiente umas excelentes propriedades específicas. A composição química da madeira e do bambu é listada na Tabela 1-1. Pode-se constatar que o bambu e a madeira têm componentes químicos muito similares, mas suas características mecânicas são bem distintas.

Tabela 2-1 Composição química e resistência à tração da madeira e do bambu.

	Madeira (Fengel & Shao, 1984)	Bambu (Fengel & Shao, 1984)
Celulose (%)	40 - 50	45,3
Hemicelulose (%)	20 - 35	-
Lignina (%)	15 - 35	25,5
Resistência à tração (MPa)	34 - 220	150 - 520

As fibras vegetais são constituídas por células individuais que por sua vez, compõem-se de microfibrilas dispostas em camadas de diferentes espessuras e ângulos de orientação. As microfibrilas são ricas em celulose, polímero vegetal de cadeias longas, e estão aglomeradas por hemicelulose amorfa. As células da fibra têm de 10 μ m a 25 μ m de diâmetro, e segundo Coutts & Warden (1992), são compostas por quatro camadas de microfibrilas (Figura 2-1): a camada primária mais externa, de estrutura reticulada; a camada secundária, S₁, também de estrutura reticulada; camada secundária, S₂, em que as microfibrilas estão orientadas segundo o ângulo θ , com relação ao eixo longitudinal da célula, em hélice, mais uma camada secundária, S₃, mais interna e com a mesma configuração da camada S₂. A camada S₂ é a maior espessura e também, a de maior teor de celulose. No interior da célula, há uma cavidade central de seção elíptica, com dimensão de 5 μ m a 10 μ m, denominada lúmen.

As diversas células, que compõem a fibras (ou macrofibra, expressão utilizada para identificar claramente o feixe de filamentos), encontram-se aglomeradas pela lamela intercelular, composta de hemicelulose, pectina e principalmente lignina (70% em média). A região central das fibras também pode apresentar uma cavidade denominada lacuna.

As lacunas e lumens são responsáveis pela grande incidência de poros permeáveis nas fibras, o que acarreta elevada absorção de água e massa específica aparente bastante inferior à real.

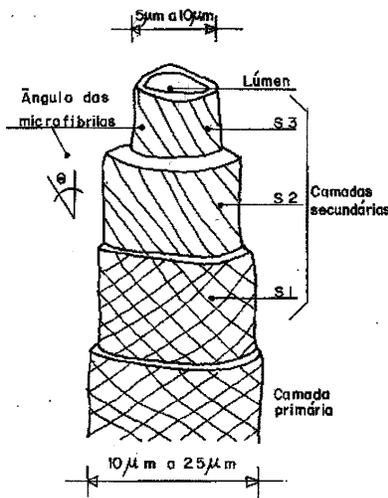


Figura 2-1 Esquema estrutural das fibras vegetais em geral (Coutts & Warden, 1992).

Para o Bambu, a estrutura celular apresenta algumas variações como é mostrado na Figura 2-2.

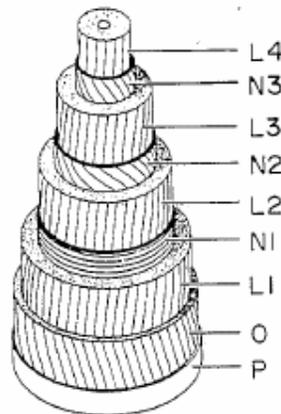


Figura 2-2 Esquema da celular de bambu (Wai, Nanko and Murakami, 1985).

onde P é a camada primária, O é a camada intermediária à camada secundária, L1 – L4 são as camadas largas e N1–N3 as camadas estreitas.

Da Figura 2-2 pode-se ver que uma fibra de bambu consiste de camadas alternadas concêntricas, largas e finas, que são compostas de microfibrilas. Os ângulos em relação respeito à linha central da fibra, e aquelas em camadas finas estão na escala 30-90°, mas na maior parte em 30-45°.

2.3. Matriz cimentícia

A estrutura dos compósitos à base de cimento Portland são estruturas heterogêneas de várias fases. A nível microscópico, a estrutura é composta por um meio ligante, a pasta de cimento hidratada, agregados, vazios e interfaces. Estas fases não estão distribuídas homogeneamente, uma em relação a outra, nem são em si mesmas homogêneas uma vez que em algumas áreas a massa de pasta aparece mais densa e em outras é altamente porosa (Mehta & Monteiro, 1994).

Além da diferença de concentração, uma das fases que compõem a microestrutura desse material é de natureza multifásica. A variação de concentração dos produtos de hidratação do cimento e da distribuição dos vazios na matriz, podem vir a trazer problemas quanto à aderência e à durabilidade das fibras vegetais que por ventura sejam incorporadas nessas matrizes.

2.3.1. Composição química do cimento

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido a partir da moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos e aluminatos de cálcio, usualmente com uma ou mais formas de sulfatos de cálcio hidráulicos, como produto de adição.

Suas matérias-primas devem conter cálcio e silício em formas e proporções adequadas, para posterior produção dos silicatos constituintes do cimento. O carbonato de cálcio é encontrado naturalmente como pedra calcária, giz, mármore e conchas do mar, tendo argila e dolomita como principais impurezas.

As reações químicas que ocorrem para a formação do cimento podem ser representadas por:

Pedra calcária + Argila + Sulfato de cálcio + Calor => Cimento Portland.

Em representação estequiométrica, tem-se:



O silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) e o silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) são os constituintes fundamentais na composição química do cimento, por serem eles os responsáveis pela resistência mecânica da pasta. O aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) é componente que se hidrata mais rápido, mas tem pouca contribuição para a resistência mecânica da pasta, já o ferro-aluminato-tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_2$) praticamente não contribui para a resistência mecânica da pasta, tendo a função de equilibrar a composição química da pasta por apresentar boa estabilidade química.

2.3.2. Microestrutura da pasta de cimento

A nível macroscópico a argamassa de cimento pode ser considerada como um material bisáfico, constituído de partículas de agregados dispersos na pasta de cimento. Já a nível microscópico é identificada uma terceira fase, a zona de transição, que geralmente é mais fraca que as demais, exercendo grande influencia no comportamento mecânico da argamassa.

Microscopicamente a estrutura da pasta endurecida de cimento Portland é dividida em (Mehta & Monteiro, 1994):

- ✓ Sólidos da pasta de cimento – formados pelos silicatos de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio, aluminatos e sulfoaluminatos de cálcio hidratado e grãos de clínquer não hidratados.

- ✓ Vazios da pasta – representados pelos espaços lamelares, vazios capilares e ar aprisionado.
- ✓ Água na pasta – água capilar e água adsorvida.

2.4. Cimento amianto

Sendo a principal motivação desta pesquisa a substituição do cimento amianto por argamassas/pastas reforçadas por polpa celulósica, desenvolve-se abaixo um pequeno histórico sobre o cimento amianto.

O amianto ou asbesto é um mineral natural de estrutura fibrosa sedosa que, por suas propriedades físico-químicas (alta resistência mecânica em altas temperaturas, incombustibilidade, boa qualidade isolante, durabilidade, flexibilidade, resistente ao ataque de ácidos, álcalis e bactérias, facilidade de ser tecida etc.), abundância na natureza e, principalmente, baixo custo tem sido largamente utilizado na indústria. É extraído fundamentalmente de rochas compostas de silicatos hidratados de magnésio, onde apenas de 5 a 10% se encontram em forma de fibras longas, de interesse comercial (INCA, 2002) (Figura 2-3).



Figura 2-3 Mineral asbesto bruto (INCA, 2002).

Os nomes latino e grego, respectivamente, amianto e asbesto, têm relação com suas principais características físico-químicas, incorruptível e incombustível.

Está presente em abundância na natureza sob duas formas: serpentinas (amianto branco) e anfibólios (amiantos marrom, azul e outros), sendo que a

primeira – serpentinas - correspondem a mais de 95% de todas as manifestações geológicas no planeta.

No Brasil é usado "cimento-amianto" (nome popular do fibrocimento, um material de construção composto de cimento Portland e amianto) como matéria prima para telhas, encanamentos, caixas d'água e peças acessórias para telhado. Cimento-amianto também é usado na produção de tecidos incombustíveis e isolantes elétricos, em filtração, e enchimento de espaços para isolamento térmico e acústico.

Material barato, de uso extenso, porém, muito perigoso pelos danos que pode causar (sobretudo aos trabalhadores que o manuseiam) e que só se tornaram conhecidos há relativamente pouco tempo.

O amianto, pela sua fragilidade, tende a se microfragmentar e se dispersar na atmosfera, onde permanece indefinidamente; sendo assim, é facilmente inalado ou engolido, sobretudo na fase de extração e manufatura de objetos. A legislação brasileira fixa o limite de tolerância para fibras respiráveis em 2 fibras/cm³ nos locais de trabalho além de equipamentos especiais de segurança para os operários que o manuseiam (INCA, 2002).

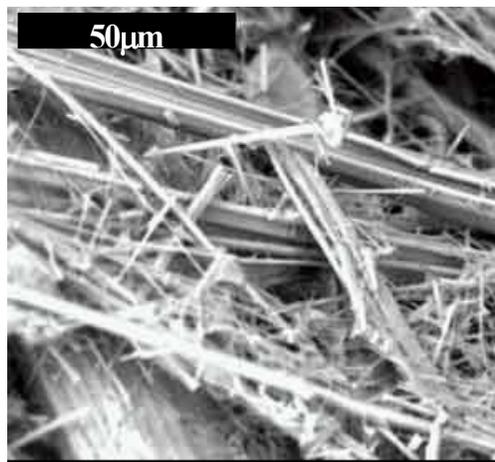


Figura 2-4 Microestrutura da fibra de asbesto.

Por ser agente potencial causador de câncer e fibrose pulmonar devido a sua microestrutura (Figura 2-4), a substituição por polpas celulósicas seria uma das alternativas. Tendo em vista suas ótimas características mecânicas, deseja-se que os novos materiais de argamassa/pasta-polpa tenham comportamento mecânico

semelhantes ao do cimento-amianto. Segundo Petrucci (1978), para um compósito cimento-amianto constituído de 1 parte de amianto para 6 a 10 partes de cimento, são listada algumas propriedades mecânicas, Tabela 2-2.

Tabela 2-2 Propriedade mecânica do cimento-amianto (Petrucci, 1978)

Propriedade mecânica	Valor característico
Massa específica real [kg/m ³]	2,6x10 ³
Massa específica aparente real [kg/m ³]	1,5x10 ³ a 2,0x10 ³
Resistência à compressão [MPa]	49 a 98
Resistência à tração [MPa]	29 a 49
Módulo de elasticidade (compressão) [GPa]	21,60

2.5. Micromecânica dos compósitos fibrosos

A interação fibra-matriz é uma propriedade fundamental dos compósitos afetando consideravelmente o desempenho dos mesmos quando submetidos ao carregamento. Uma compreensão dessa interação é necessária para estimar a contribuição e para prever o comportamento do compósito.

De acordo com Bartos (1981), dependendo do tipo de tensões transferidas através da interface podem existir dois tipos de aderência: por cisalhamento e por tração. Em compósitos reais um tipo de aderência pode ter maior importância que outro, mas em muitos casos ambos estão presentes e inter-relacionados. Outro tipo de aderência é a ancoragem mecânica, que é uma solução prática para compensar os comprimentos de ancoragem curtos e baixas tensões de aderência.

- ✓ Aderência por cisalhamento – controla a transferência de tensões paralelas ao eixo longitudinal do reforço. Em compósitos não fissurados, aderência por cisalhamento transfere tensões da matriz para as fibras. Quando a matriz fatura e as cargas são suportadas pelas fibras que controlam a fissura, a aderência cisalhante permite que a carga seja transferida de volta para a matriz em partes não fissuradas. A aderência cisalhante também resiste ao arrancamento do reforço da matriz e, portanto, é um dos principais fatores influenciando o mecanismo e o modo de ruptura do compósito (Toledo Filho, 1997).

- a- Aderência cisalhante elástica – se existe aderência cisalhante elástica na interface e tensão cisalhante não excede a resistência de aderência, os deslocamentos da fibra e da matriz permanecem compatíveis. Essa aderência elástica é o principal mecanismo a ser considerado para a predição do limite de proporcionalidade e a tensão da primeira fissura do compósito.
 - b- Aderência cisalhante friccional – a aderência cisalhante friccional resiste a deslocamentos ao longo de interface, paralelamente ao comprimento da fibra, mas permite um deslocamento relativo ao longo da interface. A aderência cisalhante friccional é usualmente assumida como sendo uniformemente distribuída ao longo da interface fibra-matriz. Esse processo é de grande importância no comportamento pós-fissuração no qual as fibras atravessam as fissuras. Propriedades como resistência e deformação de ruptura do compósito são controladas por esse modo de transferência de tensões.
- ✓ Aderência por tração – a aderência por tração resiste aos deslocamentos causados por forças que atuam perpendicularmente em relação a interface. A intensidade da aderência de tração pode variar ao longo do comprimento da interface mas o modo de ruptura é relativamente simples, quando as tensões de tração que atuam na interface excedem a tensão cisalhante de tração, um deslocamento instantâneo e total da interface ocorre. Se a intensidade da aderência de tração for relativamente alta, uma ruptura trativa poderá ocorrer na matriz, ou mesmo na fibra, ao invés de na interface.
 - ✓ Ancoragem mecânica – a ancoragem mecânica é uma solução prática para compensar os comprimentos de ancoragens curtos e baixas tensões de aderência. Nenhuma característica específica parece ter sido desenvolvida para a determinação da aderência de ancoragem. A ruptura mecânica é muito complexa e pode envolver arrancamento em ângulos variáveis, intensa localização de tensões nas fibras e fraturas pontuais ou plastificação da matriz.

2.5.1. Regra das misturas

Pela definição de Jones (1975) compósitos são materiais formados pela união de dois ou mais materiais, que mantém individualmente as suas características anteriores à união; obtendo uma interface bem definida (que é caracterizada quase sempre pela presença de uma mudança brusca de propriedades).

A vantagem dos materiais compósitos é a utilização das melhores qualidades de cada constituinte, que somados resultam num novo material com propriedades previamente projetadas.

Para a formulação da lei das misturas deve-se considerar um elemento volumétrico representativo do compósito, levando em conta as seguintes hipóteses:

- ✓ Aderência perfeita entre fibra e matriz;
- ✓ A matriz é homogênea e isotrópica;
- ✓ As fibras são longas e alinhadas;
- ✓ Isodeformação (igualdade de deformação na fibra e na matriz).

Assim sendo, a tensão unidirecional no compósito, σ_c , é dada pela equação 2-1 (Jones, 1975).

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (2-1)$$

onde σ_f e σ_m são as tensões atuantes nas fibras e na matriz, respectivamente, e V_f e V_m são suas frações volumétricas. Levando em conta a igualdade de deformação entre a fibra e matriz que por sua vez são idênticas ao do compósito (isodeformação), pode-se a partir da equação 2-1, a expressão para o módulo de elasticidade, E_c , equação 2-2.

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2-2)$$

onde E_f e E_m são os módulos de elasticidade longitudinal das fibras e da matriz.

A obtenção de compósitos reforçados por fibras alinhadas é tecnicamente difícil e por isso normalmente os compósitos utilizados na construção civil são compósitos com fibras aleatoriamente distribuídas. Assim sendo, é necessário corrigir as equações mencionadas anteriormente.

Hannant (1978) ilustra a existência de fatores de eficiência, denominando η_1 e η_2 que se refere respectivamente ao tipo de orientação que as fibras tem no interior da matriz (alinhadas, randômicas no plano ou no volume) e à variação no comprimento das mesmas.

Os valores de η_1 estão listados na Tabela 2-2 de acordo com os modelos de Cox e Krenchel, citados por Rodrigues (1999).

Tabela 2-3 Fatores de eficiência referente a orientação das fibras (Rodrigues, 1999)

Orientação das fibras	η_1 para Cox	η_1 para Krenchel
Alinhadas	1	1
Randômicas no plano	1/3	3/8
Randômicas no volume	1/6	1/5

O fator de eficiência devido ao comprimento das fibras (η_2) é determinado através das relações que consideram seus comprimentos $2l$ em relação ao comprimento crítico $2l_c$. Este último corresponde ao comprimento de uma fibra que sofre fratura, unicamente em seu ponto central, no ensaio de saca-fibra (“pull out”). De acordo com Allem, citado por Fujiyama (1997), o fator η_2 pode ser determinado a partir das equações 2-3 e 2-4:

$$\eta_2 = \frac{l}{2l_c} \quad \text{se } l \leq l_c \quad (2-3)$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{l_c}{2l} \quad \text{se } l > l_c \quad (2-4)$$

Conforme expressões 2.3 e 2.4 o fator η_2 depende do conhecimento prévio do comprimento crítico $2l_c$, que sofre influência do tipo de interface fibra-matriz que por sua vez define a tensão cisalhante desenvolvida na interface.

De posse dos valores dos fatores de eficiência, pode-se escrever a equação geral para a lei das misturas.

$$\sigma_c = \eta_1 \eta_2 \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (2-5)$$

Verifica-se, pelo equacionamento descrito, que a lei das misturas considera que as tensões nas duas fases do compósito são independentes entre si, sendo este efeito não constatado nos compósitos de matrizes cimentícias. As fibras, além de serem por si só um reforço, ainda inibem o crescimento das microfissuras da matriz evitando o efeito de concentração de deformação (região de fratura onde o espécime sofre amolecimento, enquanto que, em pontos fora desta região, ocorre descarregamento). Isto faz com que a matriz aumente sua contribuição na resistência do compósito a esforços de tração. Desta forma a resistência total à tração de compósitos à base de cimento pode ser considerada como uma combinação da resistência das fibras e do aumento da resistência da matriz plena devido a adição das fibras (Stevens. & Liu, 1994).

Para compósitos de matriz frágil a matriz falhará antes da fratura das fibras, de forma que haverá uma transferência de carga para esta. Assim o compósito com a matriz trincada estará suportando uma carga maior ou menor em comparação com o material trincado dependendo da fração volumétrica das fibras. Define-se então uma fração volumétrica crítica, V_f^c , como o valor ao qual as fibras suportarão a carga que era sustentada pelo compósito antes do trincamento da matriz. Portanto após o trincamento da matriz tem-se:

$$\sigma_c^u = \sigma_f^u \cdot V_f \quad (2-6)$$

No entanto, antes do trincamento da fibra e atendendo à condição de isodeformação, tem-se:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m^u \quad (2-7)$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_m^u \quad (2-8)$$

$$\sigma_m^u = E_m \varepsilon_m^u \quad (2-9)$$

Substituindo essas relações na equação da lei das misturas para tensão, a tensão no compósito imediatamente antes do trincamento da matriz será:

$$\sigma_c = \varepsilon_m^u E_f V_f + \sigma_m^u (1 - V_f) \quad (2-10)$$

Para $V_f = V_f^c$, σ_c na equação 2-10 tem que ser igual a $V_f^c \sigma_f^c$, portanto a fração volumétrica crítica de fibras será dada pela equação:

$$V_f^c = \frac{\sigma_m^u}{(\sigma_f^u - \varepsilon_m^u E_f + \sigma_m^u)} \quad (2-11)$$

Da equação 2-11, observa-se que um valor baixo de V_f^c pode ser obtido através da diminuição de σ_m^u , ε_m^u ou E_f . Um aumento em σ_f^u também resulta em valores baixos de V_f^c .

2.5.2. Comportamento à compressão

Resultados de estudos experimentais anteriores demonstraram tanto um aumento quanto um decréscimo da resistência à compressão com diferentes tipos de fibras. Para fibras de aço, por exemplo, Mangat & Azari (1984) e Fanella & Naana (1985) indicam um aumento na resistência que varia de zero a cerca de 25%. Para fibras poliméricas, Balaguru & Shah (1992) afirmam que até uma fração volumétrica de 0,1% a adição de fibras não afeta quaisquer propriedades do concreto endurecido. Com o aumento da fração volumétrica para 0,5%, ocorre uma redução de até 10% na resistência à compressão. Já em fibras de Sisal, Toledo Filho (1997) e Rodrigues (1999), apresentam uma redução na capacidade

de carregamento de 32% e 45% respectivamente, quando adicionado 3% em volume, de fibras de 25 mm de comprimento. Fujiyama (1997), adicionou 3% em peso e obteve uma redução de apenas 9,7% na resistência.

Nota-se que a resistência à compressão do compósito é influenciada pelo tipo e fração volumétrica das fibras. A fração volumétrica influi diretamente na trabalhabilidade da argamassa, e se a compactação for ineficiente, haverá aumento da porosidade da mistura, contribuindo para a redução da resistência. Em fibras naturais, essa redução de trabalhabilidade será maior, visto que estas apresentam capacidade higroscópica, enquanto que as fibras de aço, por exemplo, não possuem esta característica. Com a absorção de água as fibras de sisal expandem-se radialmente, cerca de 15% no diâmetro, após 8 dias de imersão em água (Toledo Filho, 1999).

Na produção de argamassa de cimento reforçada por fibras naturais, a cura do corpo de prova é geralmente por imersão em água. Após a retirada dos corpos de prova, os mesmos são secos naturalmente sob condições atmosféricas, ocorrendo assim perda da água anteriormente absorvida e a conseqüente retração de volume das fibras. Tal retração aumentará ainda mais as discontinuidades no interior da matriz.

Além das características acima apresentadas, outro fato importante decorrente da adição de fibras é observado após a execução dos ensaios. As fibras promovem a integridade do corpo de prova, assim não há fratura catastrófica do corpo de prova.

2.5.3. Comportamento no impacto

O concreto simples é um material frágil com baixa resistência e capacidade de deformação à tração. Uma das razões básicas para se adicionar fibras como reforço é aumentar a sua capacidade de absorver energia (tenacidade). Embora a tenacidade seja geralmente aceita como a capacidade do material de absorver energia, ainda existem consideráveis discussões sobre como ela deve ser medida, interpretada e usada. Um grande número de diferentes normas tem sido

desenvolvido para se determinar a tenacidade, envolvendo uma grande quantidade de configurações de ensaios.

Alguns ensaios utilizam alta velocidade de carregamento e nestes a tenacidade é determinada como a energia necessária para produzir a ruptura completa do corpo de prova ensaiado por uma simples aplicação de carga, através da queda de um peso ou de um pêndulo. Bentur & Mindess (1990) dividiram os ensaios de impacto em três tipos: qualitativo, semiquantitativo e quantitativo.

No ensaio qualitativo, a resposta ao impacto é avaliada visualmente, com base no grau de danificação do espécime após um ou mais golpes. O mais comum é o “multiple-cycle drop-weight” (quedas múltiplas de caga) desenvolvido por Schrader (1981), e tem sido usado principalmente para avaliações comparativas das diferenças entre o concreto simples e os corpos de prova reforçados.

No teste de impacto semiquantitativo, o mais comum é o ensaio Charpy. Sua configuração é a de flexão em três pontos, com um pêndulo sendo projetado no centro do corpo de prova. Para materiais dúcteis, tais como metais, onde a energia de fratura é alta comparada com as energias consumidas em outros processos absorvedores de energia, tais como, atrito e energia cinética das partes fraturadas do corpo de prova, os resultados do ensaio Charpy podem ser considerados como suficientemente precisos. No entanto para materiais frágeis, como argamassas e concretos, a maior parte da energia de impacto é consumida em outros processos que não a fratura do próprio corpo de prova e, portanto, a perda de energia pelo impacto do pêndulo é de limitado significado físico.

Para se obter resultado de ensaios quantitativos é necessário instrumentar o sistema do teste de impacto a fim de medir a quantidade de energia de fato absorvida na fratura do corpo de prova.

Toledo Filho (1997) usou o aparelho proposto pelo ACI Committee 544, para determinar a energia de impacto de argamassas reforçadas por fibras de sisal. Este método, descrito por Toledo Filho (1997), apresentou inconsistência devido à alta variabilidade dos resultados, especialmente no que se refere à constatação do aparecimento da primeira fissura. Provavelmente essa dispersão dos resultados está associada a não uniformidade de redistribuição de tensões, particularmente na presença de defeitos localizados no corpos de prova.

2.5.4. Comportamento à flexão

A carga de flexão suportada por uma viga de concreto pode ser consideravelmente aumentada pela inclusão de fibras. A presença das fibras é marcante após atingida a carga de pico, que corresponde ao início da fissuração da matriz. Assim, ao invés da ruptura brusca apresentada pela matriz plena, o compósito continua a suportar carga, embora em níveis inferiores à carga de pico, apresentando grande deformação.

Quando uma viga prismática de material elástico é carregada em flexão, as tensões e deformações longitudinais em uma dada seção transversal variam de forma linear da superfície em compressão, para atingir um máximo de tração na superfície oposta. A tensão de ruptura na superfície mais externa, calculada a partir do momento de flexão, assumindo-se um comportamento elástico, é conhecida como módulo de ruptura à flexão e é, idealmente, igual à resistência à tração do material. Na prática, mesmo para um material elástico, o módulo de ruptura é geralmente maior que a resistência à tração, pois um volume menor do corpo de prova é tencionado e tensões de flexão, que podem surgir em um ensaio de tração pelo desalinhamento das garras, são eliminadas. No entanto, a teoria convencional das vigas é inadequada para compósitos reforçados por fibras, pois a curva tensão-deformação pós-fissuramento no lado tracionado é muito diferente daquela observada em compressão.

As razões pelas quais a teoria de flexão não é aplicável aos compósitos considerando-se um material idealmente elástico e um elasto-plástico, são explicada por Bentur & Mindess (1990). A teoria de flexão é aplicável até a tensão de primeira fissura, mas não pode ser considerada para o comportamento em flexão além desse ponto. Quando o limite elástico na flexão, de um material idealmente elástico, for alcançado, ele romperá. Mas no material elasto-plástico, pode continuar suportando cargas adicionais. Tal fato é acompanhado por modificações na distribuição das tensões, com a linha neutra movendo-se para cima e a distribuição das tensões de tração se tornando retangular. Conseqüentemente, a ductilidade associada com o material pseudoplástico conduz a um aumento na capacidade de suporte de carga do material idealmente plástico,

embora a sua resistência à tração não seja mais alta que a do material idealmente elástico.

Uma curva carga-deflexão típica pode ser esquematizada como a Figura 2-5, e então ser dividida em diferentes regiões, com base no processo de ruptura, para discutir o mecanismo de suporte de carga, conforme descrita por Kobayashi & Cho (1981) para concreto reforçado com fibras de polipropileno e verificada por Toledo Filho (1999) para argamassa reforçada com fibras de sisal.

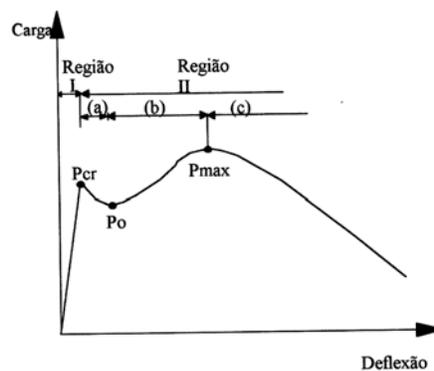


Figura 2-5 Curva esquemática carga-deflexão do concreto reforçado com fibras de polipropileno (Kobayashi & Cho, 1981).

A curva carga – deflexão pode ser dividida em duas partes: região I, que é a zona elástica antes da fissuração, e região II, que é a zona inelástica até a ruptura. Na região I, considera-se que apenas a matriz suporta carga. Como o módulo de elasticidade da fibra é baixo, se comparado com o da matriz, as fibras não trabalham para prevenir a fissura. Na região II, apenas as fibras suportam tensões de tração (como no concreto armado convencional). Essa região pode ser subdividida em três partes:

- (a) região onde a carga é transmitida do concreto para as fibras;

Nesta região as forças elásticas suportadas pela matriz são transmitidas para as fibras após a fissuração. Imediatamente após a fissuração, as fibras que virtualmente não suportavam nenhuma carga e possuem baixo módulo de elasticidade, não podem absorver a carga suportada pela matriz antes da fissuração. Assim, a capacidade de suporte de carga diminui temporariamente. A

magnitude da redução ($P_{cr} - P_0$) pode ser afetada, pelo comprimento, volume e arranjo das fibras, velocidade de carga e resistência da matriz.

(b) região onde as fibras suportam todas as forças de tração;

Na região (b), as fibras suportam todas as forças de tração e a capacidade de carga é recuperada a medida em que a fibra é estirada, com o aumento da deflexão. Uma capacidade de carga máxima, (P_{max}), que excede a carga de fissuração, pode ser alcançada dependendo do comprimento, volume e orientação da fibra.

(c) região onde a capacidade de suporte de carga decresce;

Aqui a argamassa reforçada com fibras perde gradualmente sua capacidade de suporte de carga em razão do arrancamento ou ruptura das fibras e, finalmente, a ruptura do compósito ocorre.

2.6.

Mecânica da fratura

A teoria da mecânica da fratura linear elástica começou a ser desenvolvida por Griffith na década de 20 do século passado, mas só na década de 60 é que foram desenvolvidas as primeiras pesquisas teóricas e experimentais em Lehigh University utilizando a Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) para o entendimento do fator de intensidade de tensões (K) e dos problemas estruturais que envolvem fissuras em placas, materiais compósitos anisotrópicos e corpos rachados sujeitos a carregamento dinâmico.

Além das trincas propriamente ditas a mecânica da fratura analisa materiais com vazios, inclusões ou defeitos que podem evoluir em trincas, fornecendo também subsídios para se levar em consideração o efeito de dimensão, ou seja, como o tamanho do elemento estrutural afetará o nível de carga última.

A presença de trincas enfraquece o elemento estrutural fazendo com que este possa falhar com solicitações inferiores às levadas em consideração no projeto. Portanto a metodologia da mecânica da fratura fornece critérios de projeto de componentes estruturais reais que podem conter fissuras.

2.6.1. Mecânica da fratura não linear – Integral J

Geralmente a situação limite para aplicação da MFLE é a distância entre a ponta da trinca e os contornos do corpo de prova conhecido como ligamento ($W-a$), que deve ser pelo menos oito vezes maior que o raio da zona plástica (r). Caso o espécime estudado apresente esta limitação, o escoamento faz com que o fator de intensidade de tesões, K_I , seja não conservador, subestimando a severidade da trinca existente (Dowling, 1993). Faz-se então um ajuste nos valores de K_I com base no tamanho da zona plástica. Esse ajuste é feito através da integral J (equação 2-12), que pode ser considerada como uma generalização da taxa de energia de deformação liberada, G , que será definida pela equação 2-13.

$$J = \frac{K_I^2 (1 - r^2)}{E} \quad (2-12)$$

$$J = G = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad (2-13)$$

Para os corpos de prova com entalhes profundos e submetidos a dobramentos, como os utilizados neste trabalho, a integral J pode ser dada pela fórmula estimativa de Rice (equação 2-14), como citado por Fujiyama (1999).

$$J = \frac{2U}{B(W-a)} \quad (a/W) \geq 0,5 \quad (2-14)$$

onde B e W são respectivamente espessura e largura do espécime, a é a profundidade da descontinuidade (Figura 2-6).

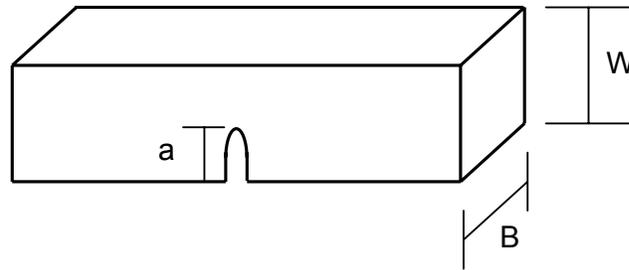


Figura 2-6 Esquema do corpo de prova sujeito a dobramento.

A energia U é equivalente ao trabalho realizado no carregamento do corpo de prova e pode ser calculada integrando a área sob a curva carga deslocamento no intervalo desejado.

Os deslocamentos registrados na curva carga deslocamento obtida no ensaio de flexão, são passíveis de erros que devem ser corrigidos para que se tenha maior precisão na determinação da energia absorvida U . Esses erros se referem principalmente ao registro simultâneo de deslocamentos relativos à deformação elasto-plástica da amostra na região de contato com os apoios durante o ensaio. A correção é feita através do ensaio de uma parte não deformada do corpo de prova já fraturado, eliminando a distância entre os apoios (Figura 2-7), até valores de carga ligeiramente superior à carga máxima obtida no ensaio de flexão. De posse das duas curvas, a correção é realizada subtraindo dos deslocamentos medidos durante o ensaio, os deslocamentos registrados no teste de correção conforme esquema apresentado na Figura 2-8 (Martins, 1996).

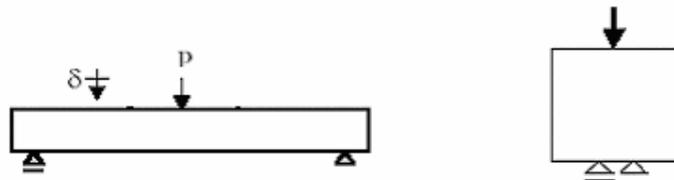


Figura 2-7 Esquema de correção dos deslocamentos para o ensaio de flexão em três pontos.

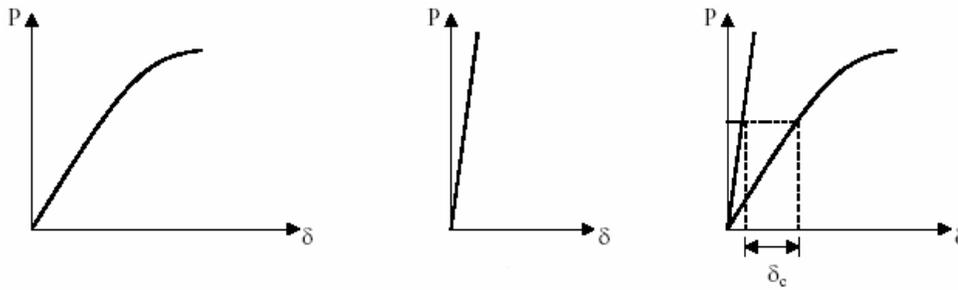


Figura 2-8 Esquema do correção para cada espécie no ensaio de flexão em três pontos.

2.6.2. Efeito das descontinuidades na resistência

Fujiyama (1997) e Rodrigues (1999) adotaram espécimes entalhados para verificar a influência da presença de descontinuidades na ruptura dos corpos de prova. Assim utilizou-se dos conceitos da mecânica da fratura, para analisar as deformações e tensões na proximidade da ponta dos entalhes e para levantar parâmetros tal como integral J .

Tomando como compósito uma argamassa reforçada com fibras de sisal, Fujiyama (1997) observou um aumento da integral J na carga máxima, que corresponde a fratura, com o aumento do raio de curvatura na raiz do entalhe. Tal comportamento é similar ao observado para materiais metálicos e não metálicos, onde J varia linearmente com o raio de curvatura. Na argamassa plena (sem fibras), observou-se que para raios de curvatura pequenos ($\rho < 1,5$ mm) a integral permanece constante e pode ser considerada como característica do material (J_{IC}). Rodrigues (1999) foi mais além, e tomando os valores de J_{IC} de Fujiyama e a magnitude da resistência à tração obtida por Toledo Filho (1997) obteve a relação do fator de concentração de tensão, K_{σ} , em função da geometria do entalhe. Verificou-se que para os entalhes utilizados, o aparecimento de uma pequena trinca ($0,05\text{mm} < a < 0,4\text{mm}$) faz com que o efeito concentrador de tensões não tenha relevância, tornando o entalhe um prolongamento da trinca formada.