## 2.1 Utilização de fibras vegetais em compósitos

O gerenciamento das reservas energéticas mundiais ainda disponíveis tem sido uma preocupação constante dos países desenvolvidos na última década. Por esse motivo a utilização de novas tecnologias nos dias atuais empregando materiais não convencionais, não poluentes e renováveis é sem dúvida alguma um desafio promissor.

Nesse sentido, pesquisas têm sido realizadas com o intuito de investigar a possível utilização de materiais não convencionais na construção civil, como as fibras vegetais. Fibras de sisal, coco, bambu, juta, curauá e outras, não poluentes e renováveis e resíduos industriais agrícolas como a cinza de casca de arroz, bagaço de cana de açúcar surgem como alternativa no reforço de matrizes cimentícias, em substituição à utilização de materiais convencionais industrializados, que mobilizam vultosos recursos financeiros além do grande consumo de energia para sua fabricação. O estudo sistemático de fibras com a finalidade de reforço de matrizes começou na Inglaterra, em 1970. No Brasil, a pesquisa pioneira coube ao centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED), Camaçari, Bahia, com início em 1980 (Bahia, 1985).

A utilização dessas fibras vegetais tem apresentado resultados promissores, sendo que a combinação de misturas de argamassa e concretos com fibras resistentes tem hoje uma presença significativa na construção civil.

Por outro lado, embora o uso de materiais convencionais na construção civil tenha atingido razoável padrão de qualidade e um estágio de fabricação aceitável, em que parte da produção é voltada para a exportação, os mesmos apresentam preços defasados em relação ao poder aquisitivo do consumidor, o que reduz o atendimento ao setor de baixa renda (Akil, 1992).

Com o intuito de resolver o problema do déficit habitacional que afeta os países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, incluindo-se o Brasil, deve-se

avaliar a possibilidade de utilização dessas fibras renováveis e considerar a utilização de tecnologias não convencionais existentes. Existe grande conhecimento de materiais e técnicas que podem ser aplicadas em construções não convencionais. Entretanto, as especificações de norma são demasiadamente centradas em materiais modernos e, em diversos casos, difíceis de serem observadas em situações específicas de obras rurais ou de habitações para atendimento de necessidades sociais urgentes (Plessis, 2001). No Brasil o número oficial para o déficit habitacional quantitativo é de 7,9 milhões de novas unidades, sendo 6,0 milhões de novas habitações nas áreas urbanas e 1,9 milhão nas áreas rurais (FGV, 2006). Deste déficit 91,6% situam-se na faixa de renda de até 5 salários mínimos.

O grande impulso na utilização de materiais não convencionais, a partir da última década, se deve principalmente à grande necessidade de substituir o uso do cimento-amianto em materiais de construção civil. O amianto é uma fibra natural, não renovável, largamente utilizada na construção civil, principalmente na fabricação de telhas, caixas d`água, e tintas. É conhecido e utilizado desde a antigüidade, como reforço de utensílios cerâmicos, encontrados em escavações, mas foram os romanos que há quase 2000 anos os extraíram das minas situadas nos Alpes Italianos e nos Montes Urais na Rússia (Abrea, 1996). O amianto tem sido também, muito empregado em larga escala após a revolução industrial, por ser excelente isolante térmico, apresentar alta resistência mecânica, ser incombustível, resistente a altas temperaturas e quimicamente resistente, sendo um material durável e flexível e apresentando também alta resistência ao desgaste e à abrasão (Abrea, 1996).

Nos países desenvolvidos, o uso de fibrocimentos que utilizam polpas celulósicas, tem sido grande, devido a constantes aperfeiçoamentos das matériasprimas, processos produtivos com consumo racionalizado de energia e custos de investimento cada vez menores (Coutts, 1992). No Brasil a totalidade do amianto comercializado é do tipo crisotila ou amianto branco, mas diversos produtos contaminados com anfibólios, proibidos por lei, têm sido empregados, entre eles o talco industrial e a vermiculita. Entretanto existe uma crescente tendência de se rever sua utilização no Brasil, especialmente no reforço de matrizes cimentícias, segmento responsável por mais de 70% do consumo mundial dessa fibra mineral.

Estima-se que a produção mundial de compósitos cimentícios com reforço de fibras celulósicas, combinadas ou não a fibras plásticas, esteja em torno de 430 milhões de  $m^2$  por ano (Heinricks et al, 2000), produção essa localizada, em grande parte, nos EUA e na Europa.

Tabela 2.1 – Produção mundial de placas de fibrocimento (milhões de m<sup>2</sup>/ano) (Heinricks et al, 2000)

ÁREA	Com amianto	Sem amianto	Total	Fração sem amianto
				(%)
Ásia e Austrália	610	80	690	12
Europa	100	190	290	66
América Central	140	50	190	26
América do Norte	0	100	100	100
África	20	10	30	33
Total	870	430	1300	33

Apesar de suas excelentes propriedades e preço acessível, a extração e beneficiamento de fibras de amianto causam doenças graves às pessoas, como a asbestose. Em função da crescente conscientização dos problemas de insalubridade associados à inalação de suas fibras de pequeno diâmetro (<2 μm), governos de vários países têm proibido a utilização desse material (Salles, 2006). No entanto a tentativa de simples substituição do amianto tem tido sucesso limitado, não sendo possível encontrar, em um único tipo de fibra, propriedades simultâneas idênticas às do amianto, sendo então necessário fazer modificações na matriz cimentícia para alcançar a interação adequada entre as duas fases (Salles, 2006).

A inserção de fibras uniformemente dispersas nos compósitos modifica as características das argamassas e concretos, possibilitando melhor desempenho em relação à matriz sem reforço, com uma sensível melhora das propriedades mecânicas desses materiais, como aumento da tenacidade, da resistência à flexão, da resistência a impactos e da capacidade de deformação, permitindo um melhor

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412168/CA

controle da fissuração e uma mudança do comportamento à fratura, conferindo uma maior capacidade de carregamento após o aparecimento das primeiras trincas (Hannant, 1978).

Além disso, para o uso desses materiais na construção civil, é extremamente importante avaliar e melhorar a durabilidade dos mesmos, particularmente quando esses materiais estão sujeitos a ambientes corrosivos. Um dos grandes obstáculos para se conseguir matrizes mais duráveis se deve à incompatibilidade da matriz com as fibras vegetais nelas incorporadas. A presença de carboidratos nas fibras, como lignina, hemicelulose e acúcares retardam a pega do cimento. Por outro lado o ataque alcalino às fibras vegetais por produtos da hidratação do cimento, especialmente o hidróxido de cálcio, provoca a mineralização das fibras com consequente fragilização das mesmas. Para minimizar tais problemas é possível incorporar às matrizes cimentícias, materiais inertes (pozolânicos), modificando a estrutura dos poros (a sua porosidade por compactação) e utilizar cimentos especiais (Toledo Filho et al 2003, Dos Anjos 2002). O emprego de cimentos compostos (com adição de material carbonáceo, escória de alto-forno e cinza pozolânica) permite a redução do uso do clínquer, com a consequente diminuição na energia gasta nos fornos rotativos das fábricas de cimento e na geração de  $CO_2$ (Cincotto et al, 1990).

Toledo Filho *et al* (2003) obtiveram uma diminuição da fragilização das fibras de sisal e coco com a imersão das mesmas em sílica, antes da incorporação com a matriz cimentícia e consideraram o tratamento com carbonatação da matriz promissor.

No Brasil destacam-se as pesquisas que vêm sendo realizadas com fibrocimentos, desde 1979, no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, sob a orientação do Prof K. Ghavami (Ghavami, 1992). O uso de cimento reforçado por fibras naturais com o intuito de produzir compósitos duráveis é sem dúvida alguma um desafio, mas que se concretizado pode criar um material de construção ecológico, resistente e durável com grande capacidade de renovação (Swamy, 2000). Coutts e Warden (1990) sugeriram que os compósitos à base de matrizes cimentícias, no caso pasta de cimento, sejam moldados sob pressão, com freqüente redução do fator água/cimento, uma vez que a água retirada sob pressão permite à fibra porosa devolver à matriz parte da água por ela absorvida, o que ajuda a manter a interface mais densa.

A adição de fibras vegetais como reforço de matrizes frágeis como a pasta de cimento, faz com que o comportamento da matriz se modifique após ser atingida a carga máxima que ela é capaz de suportar, através de um aumento na capacidade de absorção de energia pelo compósito. Desse modo o material não rompe de maneira frágil, mas sim de maneira dúctil, com as fibras interligando as fissuras, de modo que a propagação das trincas no material ocorra de modo estável (Conrado, 1999).

#### 2.2 Fibras vegetais e seu uso na construção civil

As fibras vegetais são constituídas por células individuais formadas por microfibrilas, dispostas em camadas de diferentes espessuras e ângulos de orientação. As microfibrilas são ricas em celulose, e estão aglomeradas por hemicelulose amorfa. As células da fibra têm de 10µm a 25µm de diâmetro e segundo Coutts e Warden (1992), são compostas por quatro camadas de microfibrilas (Salles, 2006). A estrutura de uma fibra de madeira é mostrada na figura abaixo, onde é vista a lamela intermediária (ML), a parede primária (P) e a parede secundária que compondo a maior parte da célula e formada por três camadas com diferentes alinhamentos de fibrilas (S1, S2 e S3).



Fig 2.1 – Esquema da estrutura de uma fibra de Madeira (Smook, 1989)

O bambu, material que foi utilizado como reforço de matrizes cimentícias nesse trabalho, é muito utilizado em vários países do mundo. Adapta-se facilmente, principalmente em regiões onde o solo e o clima não são favoráveis a outros cultivos. Muito abundante em países de clima subtropical e tropical, é uma

planta que apresenta rápido crescimento, algumas espécies crescem cerca de 20 cm em até 24h em condições favoráveis ao seu desenvolvimento (Ghavami, 1990). Com idade de 3 a 4 meses, em geral, o bambu atinge sua altura máxima e a partir daí sua resistência é aumentada, até que, com idade de 3 a 6 anos, possui resistência suficiente para seu emprego como material de construção (Ghavami, 1990). Suas fibras não são uniformemente distribuídas na seção transversal do colmo, estando em maior quantidade, cerca de 40 a 70% na parte mais externa e de 15 a 30% na parte mais interna ao longo do colmo (Salles, 2006). Nos nós, as fibras se interconectam e penetram parcialmente no diafragma e nos galhos, resultando em pontos de menor resistência (Ghavami, 1988). O bambu é muito utilizado em países como China, Índia, Japão, Filipinas e no Brasil. Quando empregado como material de construção principalmente no reforço do concreto, apresenta como principal vantagem o fato de requerer uma baixa quantidade de energia para ser produzido. Outras vantagens se referem ao fato que o bambu possui alta resistência à tração, além de permitir a conservação dos recursos naturais.. No entanto, suas principais desvantagens são que as fibras possuem baixo módulo de elasticidade, além de serem altamente higroscópicas, o que faz com que apresentem uma variação em seu volume pela absorção de água (Ghavami, 1990). Em termos tecnológicos os compósitos fabricados utilizando reforço de fibras vegetais, como o bambu, são promissores uma vez que no projeto desses compósitos exige-se que apresentem elevada resistência e ou rigidez em relação ao seu peso. Sob esse aspecto o uso do bambu como material de construção é promissor, pois como pode ser visto na tabela 3 dentre os materiais listados é o que apresenta o maior valor da resistência relativa a seu peso.

Tabela 2.2 – Relação entre a energia de produção por unidade de tensão (Ghavami,1992)

Material	Aço	Concreto	Madeira	Bambu
MJ/m <sup>3</sup> /MPa	1500	240	80	30

Material	Res Tração (σ <sub>t</sub> )	Peso Específico (v)	$\mathbf{R} = \frac{\sigma_i}{v}$	$\frac{R}{R_{aço}}$
Aço	500 N/mm <sup>2</sup>	783 N/mm <sup>3</sup>	0.63	1.00
Bambu	140 N/mm <sup>2</sup>	80 N/mm <sup>3</sup>	1.75	2.77
Alumínio	304 N/mm <sup>2</sup>	270 N/mm <sup>3</sup>	1.13	1.79
Ferro Fundido	281 N/mm <sup>2</sup>	720 N/mm <sup>3</sup>	0.39	0.72

Tabela 2.3 – Relação	entre a resistência à	tração e o peso	específico	Ghavami,	1992)
3		3 1		<b>`</b>	,

## 2.2.1 Polpas obtidas a partir de fibras vegetais

O processo de polpação pode ser caracterizado como um processo de separação das fibras mediante a utilização de energia química ou energia mecânica (Phillip, 1998). Os processos comerciais de obtenção da polpa podem ser classificados em mecânicos e químicos, podendo ser utilizado aquecimento (Salles, 2006). O sistema mecânico de polpação consiste das seguintes etapas: picagem, desfibrilamento inicial, desfibrilamento complementar, depuração e limpeza (Dos Anjos, 2002). Esse processo apesar do grande consumo de energia apresenta algumas vantagens em relação à polpação química no que diz respeito ao tratamento dos efluentes, pela menor necessidade de produtos químicos e o menor custo das polpas mecânicas no mercado (Savastano, 2000). O processo químico de produção da polpa consiste de um forte ataque alcalino às fibras que permite a remoção da lignina da lamela intermediária (Fordos e Tram, 1986). Com a remoção da maior parte da lignina mais exposta, as microfibras se tornam mais resistentes ao ataque alcalino que as macro-fibras originais (Salles, 2006). Após o processo de polpação as fibras podem ser submetidas a um processo de refino, que permite melhorar as propriedades dos compósitos por elas reforçados. Através do refino, há o encurtamento das fibras, além do surgimento de fibrilações internas que aumentam a maleabilidade das mesmas e a formação de uma maior área superficial para aderência fibra-fibra e fibra-matriz (Coutts 1984, Coutts 1988).

## 2.3 Regra das Misturas

São necessários, para adequação às tecnologias modernas utilizadas em diversas aplicações, materiais com propriedades que muitas vezes não estão presentes nos metais, cerâmicos ou poliméricos individualmente. As combinações e faixas das propriedades desses materiais foram e ainda estão sendo ampliadas através do desenvolvimento de materiais denominados de compósitos (Callister, Jr 2002).

Pela definição de Jones (1975), compósitos são materiais formados pela união de dois ou mais materiais, que mantém individualmente as suas características anterior à união, com a obtenção de uma interface bem definida, caracterizada quase sempre por uma mudança brusca de propriedades. As fases constituintes do compósito devem ser quimicamente distintas e estar separadas por uma interface distinta. Desse modo, através da combinação de diferentes materiais como os polímeros, cerâmicos e metálicos é possível obter materiais com melhores propriedades mecânicas que os materiais originais promovendo um aumento da rigidez, da tenacidade e da resistência em condições ambientes e a altas temperaturas. Em geral os compósitos apresentam duas fases distintas: uma denominada de matriz, contínua, que envolve a fase dispersa e pode ser feita a partir de metais, cerâmicos ou polímeros. As propriedades dos compósitos dependem das quantidades de cada fase presente, de sua forma e distribuição.

A regra das misturas apresenta bons resultados na determinação das propriedades elásticas e termoelásticas de compósitos, apesar desses resultados serem aproximados (Fujiyama, 1997).

Segundo a lei das misturas considerando-se um elemento volumétrico representativo do compósito as seguintes hipóteses devem ser satisfeitas:

- ✓ Perfeita aderência entre as fibras e a matriz
- $\checkmark$  A matriz deve ser homogênea e isotrópica
- ✓ As fibras longas e alinhadas
- ✓ Isodeformação (igualdade de deformação na fibra e na matriz)

De maneira geral, as propriedades finais dos compósitos reforçados com fibras são fortemente influenciadas pelas características individuais de seus componentes e pelo método de fabricação dos mesmos, dependendo dos seguintes fatores:

- ✓ Tipo de fibras
- ✓ Condição e uso das fibras
- ✓ Arranjo e distribuição das fibras
- ✓ Grau de aderência entre fibras e matriz
- Fração volumétrica das fibras
- ✓ Propriedades das fibras
- ✓ Superfície das fibras
- ✓ Processo de mistura
- ✓ Método de cura
- ✓ Durabilidade das fibras no compósito
- ✓ Nível de carregamento
- ✓ Presença ou ausência de trincas

Um dos grandes problemas quando são utilizadas fibras vegetais como reforço de matrizes cimentícias é que a microestrutura assim formada é em geral heterogênea, com alta porosidade. A presença de defeitos nos compósitos promove descontinuidades na interface, que agem como concentradores de tensão, tornando complexa a relação das interações entre fibra e matriz.

De acordo com a regra das misturas, considerando-se as hipóteses anteriormente citadas, Jones (1975) propôs uma equação que permite determinar a tensão unidirecional no compósito,  $\sigma_c$ 

$$\sigma_{\rm c} = \sigma_{\rm f} V_{\rm f} + \sigma_{\rm m} V_{\rm m} \tag{2.1}$$

onde  $\sigma_f e \sigma_m$  são as tensões atuantes na fibra e matriz respectivamente e  $V_f e V_m$ as suas respectivas frações volumétricas. Através da condição de isodeformação é possível diferenciar a equação acima em relação à deformação, obtendo-se assim o módulo de elasticidade do compósito  $E_c$  de acordo com a equação a seguir:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \tag{2.2}$$

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

Considerando-se também que o carregamento no compósito seja feito transversalmente à direção das fibras e que exista uma perfeita aderência entre fibras e matriz, pode-se inferir que as tensões atuantes no compósito são as mesmas nas fibras e na matriz. Assim as equações da regra das misturas para a deformação e módulo de elasticidade são as seguintes:

$$\varepsilon_{\rm c} = \varepsilon_{\rm f} V_{\rm f} + \varepsilon_{\rm m} V_{\rm m} \tag{2.3}$$

onde  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_f$  e  $\varepsilon_m$  são as deformações do compósito, das fibras e da matriz respectivamente.

$$1/E_{\rm c} = V_{\rm f}/E_{\rm f} + V_{\rm m}/E_{\rm m}$$
(2.4)

# 2.4. Fatores de eficiência relacionados ao comprimento e orientação das fibras

Hannant (1978) cita a existência de fatores de eficiência utilizados para corrigir as equações obtidas através da regra das misturas. Esses fatores, obtidos através dos modelos de Cox (1962) e Krenchel (1974), referem-se à orientação que as fibras apresentam no interior da matriz ( $\eta_1$ ) e à variação no comprimento das mesmas ( $\eta_2$ ).

Tipo de Orientação	Fator de eficiência η <sub>1</sub> ,	Fator de eficiência η <sub>1</sub>
	Cox (1962)	Krenchel (1974)
Alinhada	1	1
Randômica no plano	1/3	3/8
Randômica no volume	1/6	1/5

Tabela 2.4 – Fatores de eficiência em função da orientação das fibras (Fujiyama,1997).

O fator de eficiência devido ao comprimento das fibras  $(\eta_2)$  é determinado através das relações que consideram o comprimento das fibras 21 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-fibras ("pull-out").

De acordo com Allem (1972), citado por Brescansin (2003), o fator  $\eta_2$ pode ser determinado a partir das equações abaixo:

$$\eta_1 = \frac{l}{2l_c} \qquad \qquad \text{se } l \le l_c \qquad (2.5)$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{l_c}{2l} \qquad \text{se } 1 > l_c \qquad (2.6)$$

Com os valores dos fatores de eficiência,  $\eta_1 e \eta_2$  as equações para o cálculo da tensão e módulo de elasticidade dos compósitos são as seguintes:

$$\sigma_{\rm c} = \eta_1 \eta_2 \sigma_{\rm f} V_{\rm f} + \sigma_{\rm m} V_{\rm m} \tag{2.7}$$

$$E_c = \eta_1 \eta_2 E_f V_f + E_m V_m \tag{2.8}$$

# 2.4.1. Modelos para fibras curtas ou particuladas

As propriedades mecânicas de compósitos reforçados por fibras curtas ou partículas alinhadas podem ser obtidas através de equações semi-empíricas como as de Tsai-Halpin (1969).

A diminuição do comprimento das fibras incorporadas na matriz torna mais fácil a obtenção de compósitos com fibras orientadas aleatoriamente. Para se determinar se a orientação das fibras no compósito é randômica em relação ao plano ou ao volume deve-se comparar o comprimento das fibras em relação à espessura do compósito, estando aleatoriamente dispersas no volume, se seu comprimento for pequeno quando comparado à espessura do compósito. Nesse caso, considerando-se fibras aleatoriamente dispersas, o modelo de Cox (1962) mostra que o compósito assim formado é isotrópico e suas características mecânicas básicas (E, G,  $\upsilon$ ), podem ser obtidas de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 2.5 – Modelo para determinação do módulo de elasticidade, de cisalhamento e de Poisson para fibras orientadas randomicamente no compósito (Cox, 1962).

Propriedades mecânicas	Randômica no plano	Randômica no volume
Módulo de Elasticidade	$E_{c} = \frac{E_{f}V_{f}}{3}$	$E_c = \frac{E_f V_f}{6}$
Módulo de cisalhamento	$G_c = rac{E_f V_f}{8}$	$G_c = \frac{E_f V_f}{15}$
Módulo de Poisson	$v = \frac{1}{3}$	$v = \frac{1}{4}$

# 2.4.2 Influência das fibras no comportamento dos compósitos

Entre as principais considerações da adição de fibras em uma matriz de cimento, Hannant (1978) cita algumas assertivas, das quais pode-se destacar:

- Na ruptura, a deformação de algumas fibras chega a ser três vezes maior que a da matriz, o que leva a deduzir que a matriz se romperá antes da resistência das fibras ser totalmente mobilizada, sendo por essa razão, o elemento que rege o comportamento do compósito após a fissuração.
- O módulo de elasticidade das fibras é geralmente menor que o da matriz, porém devido ao baixo volume de fibras no compósito o módulo de elasticidade do compósito se aproxima do módulo de elasticidade da matriz.
- ✓ Fibras com baixo módulo de elasticidade geralmente possuem alto valor do coeficiente de Poisson, significando que quando tracionadas ao longo de seu eixo se contraem, interferindo na aderência fibramatriz.
- A dimensão máxima dos agregados da matriz afetará a quantidade e a uniformidade das fibras que poderão ser incluídas no compósito. É recomendado não se utilizar dimensões acima de 10mm, sendo impraticável o uso de dimensões acima de 20mm.

# 2.4.3 Interações mecânicas entre fibras e a matriz cimentícia

Compósitos de fibras longas são mais resistentes que os de fibras curtas. Em relação à tenacidade é importante o fato de haver oposição ao crescimento da fissura. Segundo Chawla (1987), quando o crescimento da fissura pode ser impedido de alguma maneira, então uma energia maior será requerida para fazê-la propagar-se. No esquema apresentado a seguir, quando o compósito está sob tensão, uma fissura ao surgir na matriz começa a propagar-se normalmente à superfície da interface (Fig 2a). Quando a fissura se aproxima da interface (Fig 2.b) ela é momentaneamente impedida pela fibra. Sendo a interface pouco resistente, o cisalhamento interfacial e a contração lateral da fibra e da matriz provocados pelo estado de tensão aplicado resultarão em descolamento e deflexão da fissura na direção normal à interface (Fig 2.c). Um aumento da fissura na direção principal de crescimento ocorrerá após algum tempo (Fig 2.d). Com o crescimento da tensão no compósito, o descolamento da interface continua (Fig 2.e) e a ruptura da fibra se dará em algum ponto mais fraco, ao longo de seu comprimento. As extremidades inseridas na matriz serão arrancadas, encontrando como oposição a resistência friccional da interface e finalmente haverá a total separação.



Fig 2.2 - Modelo de crescimento de trinca em compósito com fibras (Chawla, 1987)

Experimentos têm comprovado que o aumento da fração volumétrica de fibras leva ao aumento da tenacidade. Isso se deve ao fato de que são as fibras os elementos promotores do impedimento ao crescimento abrupto das fissuras. A presença de fibras em maior escala garante que mais processos de interação com a

matriz possam consumir energia, garantindo uma maior quantidade de energia requerida. Mas sabe-se que esse aumento na fração volumétrica tem um limite, que depende do tipo, da geometria e do arranjo das fibras, acima do qual há detrimento de outras características, como trabalhabilidade, homogeneidade e coesão entre a fibra e matriz, que culminam por causar um decréscimo na resistência mecânica e também na tenacidade.

# 2.4.4. Interações químicas entre fibras e matriz cimentícia

A primeira interação está relacionada à alta capacidade de absorção de água da fibra, que pode provocar a perda de contato com a matriz, com perda de resistência de aderência na interface. A segunda forma de interação entre a fibra e a matriz é a possibilidade da água alcalina do poro da matriz causar desintegração dos componentes da fibra. A terceira forma de interação fibra-matriz, é a fragilização da fibra pelo processo de mineralização, resultante da migração de produtos de hidratação, especialmente o hidróxido de cálcio, para a cavidade central, paredes e vazios da fibra, onde se cristalizam.

Gram (1984) observou que o concreto reforçado por fibras de sisal deixado ao ambiente em clima tropical, tornou-se significativamente fragilizado dentro de um período de 200 dias. Através da exposição ao ar, nos corpos de prova nos quais foram aplicados métodos de redução do ataque alcalino, observou-se que a fragilização do concreto com fibras de sisal pôde ser evitada quase completamente. Através da substituição de cerca de 45% do cimento por sílica reativa ocorre redução do pH da água do poro a níveis muito baixos, fazendo com que a tenacidade do concreto seja mantida mesmo após exposição ao ar.

## 2.5. Comportamento em compressão de compósitos cimentícios

Para fibras de aço, Mangat & Azari (1984) e Fanella & Naana (1985) observaram um aumento na resistência à compressão que varia de zero a 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. Toledo Filho (2003) e Rodrigues (1999), utilizando fibras de sisal,obtiveram uma redução na capacidade de carregamento de 32 a 45% respectivamente, quando adicionado 3% em volume de fibras de 25mm de comprimento. Fujiyama (1997) ao adicionar 3% em relação ao peso do cimento obteve uma redução de 9,7%. Salles (2006) avaliou a resistência à compressão de compósitos de pasta de cimento reforçados por polpa de bambu refinada nos teores de 8 e 14% do peso do cimento, obtendo em relação à mistura de referência (pasta pura) redução na resistência à compressão em aproximadamente 50% e 71% respectivamente.

Gutiérrez e Días e Delvasto (2005) avaliaram a resistência à compressão de compósitos de matriz cimentícia com a forma de um cubo de 50mm. Foram fabricadas cinco misturas diferentes, onde em quatro delas havia a adição de pozolanas (microssílica, metacaulim, cinza volante e escória de alto forno granulada). A adição de microssílica, metacaulim e escória de alto forno granulada aumentaram a resistência à compressão desses compósitos em 23%, 19% e 6% respectivamente, sendo que o compósito onde foi feita a adição de cinza volante apresentou uma diminuição de sua resistência à compressão se comparada com a matriz cimentícia sem adição pozolânica. Observou também que a adição de 2,5% em peso de fibras de aço, vidro, polipropileno, fique, coco e sisal em matrizes cimentícias sem adição de material pozolanico reduziu a resistência à compressão desses compósitos em respectivamente 9,5%, 22,2%, 27,8%, 20%, 9,5% e 9,5% e que a adição de 15% de microssílica nessas mesmas matrizes promoveu um aumento de 20 a 68% da resistência à compressão, se comparadas com as matrizes sem adição pozolânica. Hughes (1977) observou que a incorporação de fibras de polipropileno no concreto promoveu uma redução na resistência à compressão, com uma diminuição de seu limite de resistência,

densidade, e módulo de elasticidade se comparado com o concreto pleno. A resistência à compressão de compósitos cimentícos é influenciada pelo tipo e fração volumétrica das fibras. A fração volumétrica influi diretamente na trabalhabilidade da argamassa, de modo que quando utilizada uma alta fração volumétrica a compactação será ineficiente. Haverá aumento da porosidade da mistura, além de uma diminuição da densidade do compósito contribuindo assim para redução de sua capacidade de carregamento. No caso de uso de fibras naturais, essa redução de trabalhabilidade será maior, visto que essas apresentam capacidade higroscópica, absorvendo a água de amassamento da mistura enquanto que as fibras sintéticas não possuem essa característica (Brescansin, 2003)

Na produção de argamassa de cimento reforçada por fibras naturais, a cura do corpo de prova é geralmente feita por imersão em água. Após a retirada dos corpos de prova, os mesmos são secados manualmente sob condições atmosféricas, ocorrendo assim perda de água absorvida e a conseqüente retração de volume das fibras (Brescansin, 2003). Tal retração aumentará ainda mais as descontinuidades 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, não ocorrendo assim fratura catastrófica do mesmo.

# 2.6. Comportamento em flexão de compósitos cimentícios

Inúmeros estudos feitos com compósitos reforçados com fibras de aço e fibras de vidro demonstram que a resistência à flexão está relacionada ao aspecto (geometria) e ao volume das fibras. Toledo (1997) estudou o comportamento de argamassas reforçadas por fibras de sisal e coco, verificando que o acréscimo na resistência à flexão depende de uma combinação adequada do comprimento, fração volumétrica e arranjo das fibras. Observou que corpos de prova reforçados com fibras longas e alinhadas aumentaram a resistência a flexão em cerca de 2,6 a 4 vezes a resistência da matriz, e para corpos de prova com fibras curtas e aleatoriamente distribuídas houve um aumento de 85% da resistência à flexão quando foi utilizado 2% de fibra de sisal em volume. Figueiredo *et al* (2000) obtiveram valores de resistência à flexão aproximadamente 58% maiores do que

os apresentados pela matriz plena, ao utilizarem fibras de aço de 36 mm de comprimento e fator de forma de 53.2, com um consumo de 40 kg de fibra por metro cúbico de concreto. Coutts e Warden (1992) utilizaram polpa celulósica de sisal, obtida através de processo químico, para reforçar pasta de cimento e sílica ativa na proporção de 1:1, tendo sido utilizados teores de fibras desde 0,5% até 12% em relação à massa de material cimentício e concluíram que o teor ideal de reforço era de 8%. Savastano Jr et al (2006) testaram pó de granito proveniente do processo de britagem para a produção de agregados. O filler resultante foi usado em conjunto com aglomerante à base de cimento Portland comum e escória de alto-forno em duas formulações diferentes: 0.75:0,25 e 0,50:0,50 (aglomerante:filler). As matrizes obtidas apresentaram comportamento físico e mecânico aceitável para uso em fibrocimentos alternativos com reforço de fibra celulósica no teor de 4% em relação ao peso do cimento. Os melhores resultados dos compósitos foram associados à matriz com 25% de filler, com resistência à tração na flexão igual à 13,9 MPa para aglomerante à base de cimento Portland e energia específica de fratura igual a 0.53 kJ/m<sup>2</sup> para escória de alto forno. Coutts (1984) utilizando polpa de madeira concluiu que a variação na resistência à flexão dos compósitos produzidos com o aumento do grau de refino é muito pequena até um teor de 6% de polpa em relação ao peso do cimento. Rodrigues (2001), avaliando o comportamento à fratura de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu no teor de 8% com diferentes tipos de cura e diferentes teores de sílica ativa como substituição parcial do cimento (5%, 10%, 20% e 40%), observou que os compósitos que apresentaram melhor desempenho foram aqueles nos quais a substituição parcial do cimento foi de 20% e a cura submersa em temperatura de 75-80°C por 24 horas, seguida de cura em água à temperatura ambiente, onde obteve uma resistência à flexão dos compósitos de 8,4 MPa. Savastano Jr. et al (2003), utilizando matriz de cimento Portland e de escória de alto forno, com a incorporação de 8% de fibras de sisal, obteve uma resistência à flexão desses compósitos de 18 MPa, 58% maior do que para a matriz sem reforço. Dos Anjos (2002), avaliando a resistência à flexão de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu com e sem refino verificou que para os compósitos com polpa sem refino o teor ideal de reforço era de 6% e sua resistência a flexão foi de 10,9 MPa e para os compósitos com polpa refinada, o teor ideal de reforço era de 8% e sua resistência a flexão de 14,5 MPa

representando um acréscimo de 35,7% e 107,9% respectivamente em relação à matriz sem reforço. A deflexão de ruptura dos compósitos com polpa refinada aumentou de 0,16 mm para 0,77 mm, o que representa um aumento de 381%.

Experiências feitas por Coutts com compósitos reforçados por fibras de celulose demonstraram que a proporcionalidade existe até um certo valor do volume de fibras, após esse valor a resistência à flexão apresenta um decréscimo. Acredita-se que este comportamento seja devido a falhas no processo de fabricação do compósito, onde elevadas quantidades de fibras dificultam a moldagem do compósito.

Quando um material é carregado em flexão, as tensões e deformações longitudinais em uma dada seção transversal variam de forma linear da superfície em compressão até atingir um máximo de tração na superfície oposta. No entanto a teoria convencional de 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.

A teoria de flexão só é aplicável até a tensão de primeira fissura, mas não pode ser considerada para o comportamento em flexão após esse ponto. Para um material elástico, quando a carga máxima na flexão é atingida ele rompe (Brescansin, 2003). Mas o material elasto-plástico pode continuar suportando cargas adicionais. Isto ocorre através de modificações na distribuição das tensões, com a linha neutra movendo-se e a distribuição das tensões de tração tornando-se retangular (Brescansin, 2003). Conseqüentemente, a ductilidade associada com o material pseudoplástico conduz a um aumento na capacidade de suporte de carga do material idealmente plástico, embora sua resistência à tração não seja mais alta que a do material idealmente elástico. (Brescansin, 2003).

## 2.6.1 Comportamento em flexão de compósitos com e sem descontinuidades

A tensão normal  $\sigma_n$  atuante em qualquer fibra paralelamente ao eixo de um corpo de prova carregado em flexão é proporcional a sua distância à linha neutra, sendo as forças que atuam na seção transversal representadas por um conjugado interno que equilibra o conjugado externo (momento fletor), como pode ser visto na figura abaixo:

35



Fig 2.3 – Viga carregada em flexão de três pontos

O valor máximo do momento fletor (M) que atua na viga mostrada na Fig 2.3 ocorre na seção central e é obtido através da expressão :

$$M = \frac{P}{2} * \frac{L}{2} = \frac{PL}{4}$$
(2.9)

onde P é a carga aplicada e L o vão entre os apoios.

Para uma seção retangular de espessura B e profundidade W a tensão máxima obtida a partir da teoria de vigas dentro do regime linear elástico é expressa como :

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{3PL}{2BW^2} \tag{2.10}$$

Por outro lado, na presença de descontinuidades na seção transversal da viga, haverá uma variação na distribuição de tensões nessa região. Isto ocorre porque as descontinuidades funcionam como concentradores de tensão, onde a tensão que atua na seção é amplificada pelo fator de concentração de tensões elásticas  $K_{\sigma}$ . Levando em conta esse efeito, a tensão atuante na ponta do defeito pode ser expressa como:

$$\sigma_{máx} = K_{\sigma} \sigma_n \tag{2.11}$$

onde  $\sigma_n$ é a tensão nominal na ponta.

O módulo de elasticidade para uma viga prismática submetida à flexão em três pontos pode ser determinado a partir da equação da linha elástica, de acordo com a equação 2.12.

$$E = \frac{4PL^3}{BW^3\delta}$$
(2.12)

onde  $\delta$  é a deflexão máxima (flecha).

No entanto sabe-se que durante a aplicação da carga ocorrem erros na medição do deslocamento  $\delta$  devido ao registro simultâneo de deslocamento relativo à deformação elastoplástica da amostra, que ocorre na região de contatoentre cutelo superior e o material.

Para determinar o valor correto de  $\delta$  é necessário realizar uma correção de seu valor ensaio, através do carregamento da parte do corpo de prova não deformada, eliminando-se a distância entre os apoios até níveis de carga próximos à carga máxima obtida no ensaio monotônico. Uma vez obtida a curva de correção do ensaio, subtrai-se dos deslocamentos medidos no ensaio os obtidos pela curva de correção (Martins, 1996).

# 2.7. Mecânica da fratura e sua aplicação em componentes estruturais

Quando em serviço é comum que materiais apresentem pequenos defeitos como trincas em regiões de altas tensões, redução brusca de sua seção resistente, entre outros. A avaliação desses defeitos e sua influência na vida útil de componentes em serviço é feita pela mecânica da fratura, que avalia se o componente estará sujeito à fratura catastrófica quando carregado em tensões normais de serviço e o grau de segurança que um componente trincado apresenta.

A análise de trincas tem sido feita recentemente usando os conceitos da mecânica da fratura linear elástica. Tem sido muito empregada em projetos de componentes estruturais que apresentam alta resistência mecânica, uma vez que possuem uma zona plástica restrita, ou seja o tamanho da zona plástica é pequeno em relação ao tamanho da trinca e das dimensões da estrutura onde ela reside. Foi a primeira metodologia desenvolvida com o intuito de tornar possível a modelagem de problemas onde não há garantia de inexistência total de defeitos,

não podendo dessa forma ser desprezados. A mecânica da fratura permite analisar como a influência da presença de defeitos afeta a resistência de uma estrutura (Oliveira, 1991). Os primeiros estudos foram desenvolvidos por Griffith (1920), mas só em 1960 é que foram desenvolvidas as primeiras pesquisas teóricas e experimentais para o entendimento do fator intensidade de tensões (K) e dos problemas estruturais que envolvem fissuras em placas, materiais compósitos anisotrópicos e componentes sujeitos à carregamentos cíclicos (Brescansin, 2003). Griffith (1920) utilizou sua teoria para materiais frágeis através de uma abordagem baseada em balanço termodinâmico que definia a condição necessária para que ocorresse a propagação instável da trinca (Lopes, 2001). Porém mais tarde através dos conceitos introduzidos por Irwin (1957) e de correções à teoria de Griffith (1920), foi possível aplicá-la a materiais que sofrem deformações plásticas, onde a energia necessária para a fratura é superior à energia consumida na criação de novas superfícies da trinca (Lopes, 2001). Além de analisar o efeito da presença de trincas na resistência dos componentes, a mecânica da fratura também permite a análise de materiais que contém inclusões e vazios que podem vir a coalescer e formar pequenas trincas, além de considerar como a geometria da peça influencia na carga máxima que o componente pode suportar.

No entanto a utilização da mecânica da fratura era limitada, pois muitos componentes operam no regime elasto-plástico. Como decorrência da necessidade da extensão da mecânica da fratura a esse regime, foram desenvolvidos novos conceitos, como o CTOD por Wells (1961), o da integral J por Rice (1968) e o das curvas de resistência R. No passado, o enfoque dos estudos de fadiga era restrito a processos de danos e formação de trincas. Mas a partir da década de 60 teve início a investigação dos processos que levavam ao crescimento das trincas, uma vez que as trincas de fadiga não cresciam de maneira catastrófica, mas de maneira sub-crítica, sendo um dos avanços mais significativos no campo da mecânica da fratura a sua aplicação na análise de trincas de fadiga, a partir do trabalho de Paris, Gomes e Anderson (1961). Esses autores constataram que em componentes trincados submetidos a carregamentos cíclicos, a taxa de propagação de trincas era função da faixa do fator intensidade de tensão aplicada, além da razão de tensões de carregamento. Ficava assim evidenciado que em situações de carregamento cíclico com faixas do fator intensidade de tensão aplicado, menores que o fator intensidade de tensão crítico, embora não ocorresse a fratura, havia crescimento de trinca. Esse trabalho mostrou ser possível a aplicação da metodologia da mecânica da fratura aos problemas de fadiga. A aplicação da mecânica da fratura à fadiga criou imensas possibilidades, tanto sob o ponto de vista da compreensão do comportamento dos materiais, como componentes e estruturas, quanto na prevenção de falhas por fadiga e na caracterização da integridade das estruturas. Entretanto, há algumas dificuldades, ou mesmo limitações na aplicação dessa metodologia aos problemas de fadiga. Entre as principais dificuldades pode-se citar o comportamento das trincas curtas, que fogem ao tratamento clássico da mecânica da fratura aplicada à fadiga. Do mesmo modo, nos materiais submetidos a sobrecargas trativas, o princípio da similaridade deixa de ocorrer enquanto persistirem os efeitos de retardamento na propagação da trinca, devido à sobrecarga. Por esse princípio, iguais valores da faixa do fator de intensidade de tensão e razão de tensões deveriam promover iguais taxas de propagação de trincas. Essa dificuldade é agravada na fadiga com amplitude variável, onde as interações dos carregamentos fazem com que o comportamento em fadiga fique dependente do histórico de carregamento, onde só há similaridade para históricos iguais.

# 2.7.1 Fator de Intensidade de Tensões

Com o objetivo de quantificar o estado de tensões atuante nas proximidades de descontinuidades em materiais com comportamento elástico, Irwin (1957) definiu o fator de intensidade de tensões em modo I como:

$$K = \lim_{\rho \to 0} \frac{\sigma_{máx}}{2} \sqrt{\pi \rho}$$
(2.13)

onde  $\sigma_{máx}$  é a tensão máxima atuante na ponta da trinca e  $\rho$  raio de curvatura na ponta da trinca.

De posse dessa expressão pode-se quantificar o estado geral de tensões atuantes num ponto nas proximidades da ponta da trinca como sendo:

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} * f_{ij}(\theta) \qquad r << a \qquad (2.14)$$

onde r e  $\theta$  são as coordenadas polares do ponto em questão e  $f_{ij}$  função do ângulo  $\theta.$ 

Cabe mencionar que  $\sigma_{max}$  constante da equação 2.13 é definida conforme 2.11. Expressões típicas do fator K, citadas na literatura (Knott, 1979) são apresentadas a seguir:

$$K = \sigma \sqrt{\alpha \pi a} \tag{2.15}$$

$$K = \frac{P}{BW^{1/2}} f(a/W)$$
(2.16)

onde  $\alpha$  e f são funções que dependem da geometria da trinca e das dimensões do corpo de prova.

# 2.8. Fadiga

É a falha mais comum que ocorre na grande maioria dos materiais que estão submetidos a tensões flutuantes ou cíclicas. Como conseqüência, devido à acumulação de defeitos, esses materiais rompem-se a tensões muito inferiores àquelas determinadas nos ensaios de tração ou compressão. Microtrincas já nucleadas propagam-se, aumentando de tamanho até alcançarem um tamanho crítico, tornando-se instáveis, propagando-se instantaneamente e provocando a ruptura súbita e imediata do material. O estudo do comportamento mecânico dos materiais sob fadiga permite prever até quando determinadas estruturas sujeitas a cargas dinâmicas poderão continuar sendo utilizadas sem apresentar riscos de falhas, ou ainda de que maneira pode-se retardar a propagação das trincas, visando aumentar a vida útil do material e também determinar os intervalos de tempo, nos quais seriam necessárias manutenções preventivas para que algum mecanismo de falha previamente iniciado pudesse ser detectado, antes de provocar a falha total do material (Dowling, 2002).

O processo de fadiga pode ser dividido em 3 estágios:

- ✓ Estágio I Esse estágio envolve a nucleação da trinca e sua propagação em dimensões muito pequenas. Nos materiais metálicos, o mecanismo mais aceito de nucleação de trinca baseia-se no deslizamento de planos, promovido pelo acionamento das discordâncias.
- ✓ Estágio II Esse estágio corresponde à propagação estável da trinca até alcançar o seu tamanho crítico.
- ✓ Estágio III Corresponde ao estágio final de propagação da trinca. Ocorre a propagação instável da trinca, que se inicia assim que a trinca atinge seu comprimento crítico no seu último ciclo de carregamento (falha catastrófica)

Não existe uma separação nítida entre os dois primeiros estágios, pois os mecanismos envolvidos são essencialmente os mesmos. A pré-existência de singularidades ou descontinuidades na superfície pode dispensar a etapa de nucleação da trinca e assim diminuir a duração do estágio I. Essas singularidades podem ser geométricas, como entalhes e pré-trincas. O estágio final de falha, que ocorre de maneira quase instantânea, é muito diferente dos dois primeiros, tanto nos mecanismos quanto no aspecto macroscópico da fratura, sendo visível a separação entre a região submetida aos dois primeiros estágios e a região submetida ao último (Oliveira,1991). O número total de ciclos que o material resiste até a falha é a soma do número de ciclos nos dois primeiros estágios.

Os primeiros estudos realizados sobre o comportamento de materiais sujeitos à carregamentos cíclicos foram realizados por Albert na Alemanha em 1828. Inúmeros pesquisadores, destacando-se Poncelet e Wohler, em meados do século 19, procuraram estudar fadiga em resposta às falhas ocorridas em trilhos de estradas de ferro, eixos de diligências, engrenagens e vigas.

Destacou-se o trabalho de fadiga de Wohler (citado por Dowling) em 1850, motivado por falhas em trilhos de estradas de ferro. Ele procurou desenvolver estratégias de projeto para evitar falhas por fadiga e testou diversos

tipos de aço e outros metais submetidos à flexão, torção e carregamentos axiais. Demonstrou também que a fadiga não era afetada somente por tensões cíclicas, mas também por estáticas. Estudos aprofundando a pesquisa de Wohler, na predição dos efeitos de tensões médias foram realizados por Gerber e Goodman, citados por Dowling (2002).

Nas duas últimas décadas destaca-se um grande número de trabalhos sobre o comportamento em fadiga, entre eles os trabalhos de Magalhães *et* al (1995), Lee e Bar (2002) e Subramaniam e Shah (2003). Magalhães *et* al (1995), estudou o comportamento em fadiga de compósitos de matriz cimentícia envelhecidos (imersão em água por 84 dias) e não envelhecidos (testados após 28 dias), reforçados por fibras de vidro, nos teores de 0,4, 1,0 e 1,6% em massa. Foi avaliado o número de ciclos correspondente a uma redução de 5, 10 e 20% na amplitude de tensão desses compósitos. Um rápido decréscimo na amplitude de tensão foi encontrado para todos os compósitos, não tendo sido observado nos mesmos danos macroscópicos. Após 200000 a 250000 ciclos (20% de redução na tensão aplicada), a amplitude de tensão variou pouco, sendo a diminuição da mesma menor para os compósitos artificialmente envelhecidos.

Lee e Bar (2002) avaliaram o comportamento de compósitos cimentícios reforçados por fibras de aço, quando submetidos a ensaios de fadiga em compressão e flexão, plotando curvas de amplitude de tensão nominal (S) versus log N. Avaliaram o comportamento para o concreto pleno e para os reforçados com fibras nos teores de 0,5 e 1,0 % em massa, corroborando resultados obtidos por diversos autores na literatura. Obtiveram grande espalhamento dos resultados e constataram que a presença de fibras no concreto aumentou a sua resistência à fadiga, quando submetido à carregamento cíclico trativo, não tendo provocado aumento na mesma em carregamento compressivo. Subramaniam e Shah (2003) avaliaram a propagação de trincas de fadiga no concreto, submetido a carregamento cíclico com amplitude constante, e observaram que no início a trinca é sujeita a um estágio de desaceleração, seguido por um de aceleração. Nesse último o crescimento da trinca pode ser modelado pela lei de Paris. Os testes de fadiga foram conduzidos para três níveis de carregamento diferentes 75%, 85% e 90% da carga máxima determinada nos ensaios monotônicos.

## 2.8.1. Fatores que afetam a resistência à fadiga

Inúmeros parâmetros como as tensões nominais e locais atuantes no material, sua geometria, propriedades e condições ambientais como a temperatura e o meio onde a peça opera afetam o desempenho em fadiga dos materiais. Com relação às tensões, pode-se citar como parâmetros que influenciam na resistência à fadiga (esforços axiais, de flexão, torção ou mistos), o intervalo de variação de tensões ( $\Delta \sigma$ ), a tensão média ( $\sigma_m$ ) e a máxima ( $\sigma_{máx}$ ) além da freqüência de aplicação das mesmas. No que se refere a aspectos geométricos, pode-se citar a forma e o tamanho da peça, assim como o seu acabamento superficial. As propriedades do material que afetam seu comportamento em fadiga incluem as metalúrgicas e mecânicas, como microestrutura, homogeneidade, resistência à tração, ductilidade e tenacidade.

Dentre todos os parâmetros, a flutuação da tensão aplicada e a deformação resultante são de interesse fundamental para a resistência à fadiga. Um aumento do desempenho à fadiga vem sempre acompanhado da homogeneização das tensões (decréscimo na severidade da concentração das mesmas ou na magnitude da tensão nominal aplicada). Os parâmetros que afetam a vida fadiga de um material dependem da intensidade das tensões atuantes no material, relacionada aos fatores concentradores de tensões, seja devido à geometria da peça ou a aspectos metalúrgicos.

Além do efeito concentrador das tensões, destaca-se também o efeito da tensão média. A maioria das curvas de fadiga encontradas na literatura foi determinada para ciclos alternados de tensões, onde a tensão média atuante é igual a zero. Entretanto, em condições práticas é muito comum ocorrerem situações onde embora haja um ciclo reverso de aplicação das tensões, a tensão média atuante não é nula. Para tensões médias diferentes de zero o aumento da mesma reduz o limite de resistência à fadiga do material e à medida que a razão entre as tensões de carregamento se torna maior e positivo, esse limite aumenta. (Maddox, 1975).

Os principais parâmetros de um ciclo de fadiga estão representados na figura abaixo:



Fig 2.4 - Esquema que apresenta os parâmetros básicos de um ensaio de fadiga

✓ Amplitude de tensão ( $\sigma_a$ )

$$\sigma_{a} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$
(2.17)

✓ Tensão média ( $\sigma_m$ )

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{\min}}{2} \tag{2.18}$$

✓ Razão de tensão (R)

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{max}}$$
(2.19)

✓ Variação de tensões ( $\Delta \sigma$ )

## 2.8.1.1. Geometria do corpo de prova

Existem inúmeras dificuldades em se avaliar como o tamanho da peça pode vir a influenciar o comportamento em fadiga de um material, uma vez que:

- ✓ A distribuição das tensões residuais presentes na peça variam com as suas dimensões.
- ✓ A preparação de amostras com diâmetros diferentes e que sejam geométrica e metalurgicamente similares é praticamente impossível.
- Os equipamentos para realização de ensaios dinâmicos apresentam limitações principalmente quanto às dimensões das peças a serem testadas.

Diversos trabalhos na literatura, destacando-se o de Honeycomb (1968) mostraram que o aumento no tamanho do corpo de prova promove uma diminuição no limite de fadiga, em conseqüência, na maioria das vezes, de heterogeneidades na sua microestrutura.

## 2.8.1.2. Acabamento Superficial

Um dos principais fatores que influenciam na resistência à fadiga é o acabamento superficial. Para as situações mais comuns de aplicação de esforços, as tensões máximas às quais os componentes estão submetidos ocorrem em sua superfície. Como conseqüência, a maioria das trincas que conduzem à ruptura por fadiga tem início na superfície. Assim é importante que os fatores que influenciem positivamente a resistência à fadiga sejam levados em consideração em regiões próximas à superfície do material. A rugosidade da superfície, tratamentos superficiais, a direção das linhas de usinagem ou polimento são de grande importância no desempenho em fadiga. Durante operações de usinagem, pequenas marcas e ondulações podem ser introduzidas na superfície da peça pelas ferramentas de corte. Essas irregularidades diminuem a resistência à fadiga, que pode ser melhorada pela aplicação de polimento à superfície da peça.

# 2.8.2. Curvas de Fadiga

O comportamento de materiais sujeitos a carregamentos cíclicos pode ser avaliado através de ensaios de fadiga.

A apresentação desses resultados é feita através de curvas que relacionam a deformação  $\varepsilon$  com o número de ciclos para falha N (curvas  $\varepsilon$ -N) no caso de fadiga de baixo ciclo e a tensão S com N (curvas S-N ou de Wohler) para a fadiga de alto ciclo. A fadiga de baixo ciclo é controlada principalmente pelas deformações plásticas, geradas pelos carregamentos cíclicos. Apresenta nos materiais metálicos taxa de movimentação de discordâncias maior, em conseqüência de valores de amplitude maiores do que os obtidos nas curvas S-N e um menor número de ciclos, antes do material falhar. É caracterizada pela presença de deformação plástica cíclica acentuada, possibilitando determinação do comportamento dúctil do material.

Na fadiga de alto ciclo as deformações plásticas são localizadas, significando um comportamento macroscopicamente elástico e como conseqüência há um número maior de ciclos, em comparação ao de baixo ciclo, antes do material falhar.

Em ensaios de fadiga de alto ciclo submete-se o corpo-de-prova a um ciclo de tensões com uma tensão máxima, geralmente da ordem de grandeza de dois terços do limite de resistência à tração, repetindo-se esse procedimento com outros corpos de prova, com diminuição gradativa da tensão máxima aplicada.

Para alguns materiais as curvas S-N apresentam um limite de fadiga, abaixo do qual o material pode ser ciclado indefinidamente, enquanto que para outros não existe esse limite e, portanto, a vida-fadiga dos mesmos está associada a um determinado número de ciclos. Para a obtenção das propriedades de resistência à fadiga em cargas cíclicas devem ser ensaiados vários corpos-de-prova do mesmo material, com condições idênticas de tratamento térmico, acabamento superficial e mesmas dimensões para diferentes cargas até a ruptura, registrando-se o número de ciclos onde a ruptura ocorreu. Essas tensões são lançadas em um gráfico, em função do número de ciclos para a fadiga em escala logarítmica. Devido à grande quantidade de fatores que afetam a resistência à fadiga, as curvas S-N apresentam grande dispersão dos resultados, podendo atingir até uma ordem de grandeza na escala logarítmica.

Embora exista um crescente interesse quanto a falhas por fadiga em baixo ciclo, visando determinar modelos que relacionem as várias etapas de fadiga com a mecânica elasto-plástica, os estudos de fadiga estão historicamente relacionados com condições de serviço de baixa tensão (alto ciclo).

# 2.8.3. Modelagem das curvas de Fadiga de alto ciclo

Ao ser solicitado por uma tensão de tração  $\sigma$ , qualquer material responde com uma deformação inicialmente elástica. Após um determinado nível de tensão, as deformações aumentam e assumem um caráter permanente, constituindo a região plástica.

No que se refere à fadiga de alto ciclo, a expressão devida a Manson-Coffin, (1954) abaixo descreve a relação entre a amplitude de tensão  $\sigma_a$  e o número de ciclos para falha no regime de carregamento cíclico reverso ( $\sigma_m = 0$ ).

$$\sigma_a = \sigma_f (2N)^b \tag{2.21}$$

onde  $\sigma'_{f}$  é o coeficiente de resistência à fadiga (aproximadamente igual à tensão de ruptura do material) e b o expoente de resistência à fadiga.

Para tensão média não nula a equação acima é modificada para:

$$\sigma_a = (1 - \sigma_{m/\sigma_u}) \sigma_f^{'} (2N)^b \qquad (2.22)$$

onde  $\sigma_u$  é a tensão última levantada no ensaio de tração uniaxial

Em um gráfico log  $\sigma_a$  versus log (2N) a equação acima produz uma família de curvas S-N para diferentes valores de tensão média, que são retas paralelas.

# 2.9 Propagação de trincas em carregamentos de amplitude constante

Em ensaios de fadiga, é possível obter o campo de tensões em um ponto ao redor da ponta da trinca através do fator de intensidade de tensões K, sendo este função do carregamento, do comprimento instantâneo da mesma e da geometria do corpo de prova (Oliveira,1991). Para ensaios realizados com variação constante de carregamento, às tensões máxima e mínima estão associadas valores máximo e mínimo do fator K.

A modelagem para a taxa de crescimento de trinca, com base na Mecânica da Fratura linear Elástica é descrita através da seguinte equação:

$$da/dN = f(\Delta K, R)$$
(2.23)

onde a é o tamanho da trinca, N o número de ciclos,  $\Delta K$ , a variação da intensidade de tensões ( $K_{max} - K_{min}$ ) e R a razão de tensões ( $\sigma_{min} / \sigma_{max}$ ).

Algumas expressões para a função f têm sido propostas, sendo a grande maioria empírica. Paris e Erdogan (1963) propuseram a expressão a seguir que ficou conhecida como a lei de Paris:

$$da/dN = C \left(\Delta K\right)^{m} \tag{2.24}$$

onde C e m são constantes características do material.

A faixa de aplicabilidade da equação de Paris-Erdogan depende do material e da espessura do corpo de prova, limitando-se a um valor de aproximadamente 80% da tenacidade em carregamento monotônico do material ( $K_{Ic}$ ). A partir desse limite observa-se em geral, o início do crescimento acelerado da trinca de fadiga. Com esse crescimento acelerado o valor de  $K_{Ic}$  será atingido rapidamente e a seção resistente do corpo de prova sofrerá fratura instantânea. Nesse estágio o modo de falha não é mais por fadiga, observando-se, pelo aspecto da seção fraturada a diferença drástica entre os mecanismos atuantes (Oliveira, 1991).

Bastian (1991) ressalta que o trabalho de Paris é de grande relevância pois introduziu na teoria de fadiga o conceito do fator de intensidade de tensões, desenvolvido para a fratura monotônica, tornando possível a aplicação da

Mecânica da Fratura à fadiga. Na fratura monotônica, a força motriz para a propagação da trinca é o fator de intensidade de tensões K, enquanto que na fadiga essa força é a faixa de variação do fator de intensidade de tensões,  $\Delta$ K. Há fratura monotônica, quando a força motriz para a fratura se iguala à tenacidade à fratura. Na fadiga, a propagação da trinca é subcrítica, com a força motriz  $\Delta$ K provocando uma extensão da trinca com uma velocidade da/dN.

As constatações de Paris e colaboradores são hoje, universalmente aceitas, embora tenham sido durante muito tempo motivo de controvérsias. A principal contestação baseava-se no argumento de que o valor do fator de intensidade de tensões, válido para situações de comportamento elástico linear ou de plasticidade muito reduzida na ponta da trinca, não poderia ser utilizado para caracterizar o fenômeno de fadiga, resultante de um processo de deformação plástica por carregamento cíclico. Essa objeção foi vencida de maneira irrefutável por resultados apresentados por Paris e Erdogan (1963) sobre a propagação de trincas de fadiga em ligas de alumínio, em corpos de prova de diferentes geometrias e várias faixas de tensões e tamanhos de trincas.

No entanto deve-se lembrar, conforme mencionado anteriormente, que a lei de Paris se refere a apenas uma parte da vida fadiga dos componentes. A curva que descreve a vida fadiga, inteira está apresentada esquematicamente na Fig 2.5, onde se pode observar as três regiões I, II e III

# 2.10 Determinação das curvas da/dN versus ∆K

Para a determinação das curvas de propagação de trincas de fadiga em função de  $\Delta K$ , deve-se inicialmente obter as curvas do tamanho de trinca em função do número de ciclos de carregamento. Com esse objetivo, submete-se um corpo de prova trincado a um carregamento cíclico com razão de tensão constante, determinando-se o tamanho da trinca em função do número de ciclos. A partir de tal relação é possível determinar as taxas de propagação da trinca da/dN, representando-as em função de  $\Delta K$  para uma razão de tensão considerada. Normalmente, as curvas da/dN versus  $\Delta K$  podem ser apresentadas em gráficos log-log.



Fig 2.5 – Exemplo de curva da/dN versus  $\Delta K$  (Callister, 2002).

É possível identificar nessas curvas as três regiões (I, II e III), que apresentam as seguintes características:

- ✓ Região I Encontra –se próximo a um valor mínimo de  $\Delta K$ , conhecido como  $\Delta K_{th}$  do material, onde abaixo desse valor não se verifica o crescimento da trinca. Essa região é importante, pois para valores de  $\Delta K$ superiores a  $\Delta K_{th}$  ocorre a propagação da trinca. Assim,  $\Delta K_{th}$  é um parâmetro de resistência à fadiga do material.
- Região II Região onde existe uma relação exponencial entre as variáveis da/dN e ΔK, o que corresponde à formulação proposta por Paris. Nessa região tem-se um crescimento de trinca com taxas intermediárias, entre as taxas observadas para as duas outras regiões
- ✓ Região III É uma região onde a taxa de propagação da trinca é muito elevada e a vida em propagação é muito pequena. Ela é controlada

principalmente pela tenacidade à fratura do material e é de pequena importância na maioria das situações de fadiga.