

### 3 Carregamento Produzido por Impacto

#### 3.1. Considerações Gerais

Quando um carregamento é aplicado com uma taxa de aplicação consideravelmente pequena, este é considerado como sendo um carregamento quase-estático ou simplesmente carregamento estático.

Um carregamento dinâmico difere do carregamento estático basicamente em dois pontos. A primeira diferença a ser notada é a natureza da variação com o tempo do problema dinâmico, onde a força e a resposta variam com o tempo. A segunda diferença está relacionada ao fato de que para manter o equilíbrio o sistema altera sua posição cinemática produzindo forças de inércia.

Carregamento de impacto é um carregamento dinâmico em que a taxa de carregamento é quase instantânea, e as forças de amortecimento não conseguem dissipar quantidade significativa de energia. A resposta estrutural depende não somente da energia de impacto, mas também da rigidez da estrutura, da rigidez do contato, e das propriedades mecânicas dos materiais.

A magnitude das ações dinâmicas e sua relação com o tempo dependem do tipo de excitação aplicada ao sistema e das propriedades dinâmicas deste. Ressalta-se que sob carga de impacto, muitos materiais que apresentam comportamento dúctil quando submetidos a carregamento estático podem apresentar comportamento frágil. Este comportamento é devido à impossibilidade da redistribuição de tensões durante um período muito curto de deformação. Para carregamentos de curta duração, com tempo de aplicação do carregamento inferior a  $1/4$  do período natural do sistema, a ação dinâmica máxima depende principalmente da magnitude total do impulso imposto, sem ser influenciado pela forma como o impulso é aplicado (CLOUGH, 1993).

Os efeitos de carregamento de impacto em elementos estruturais podem ser avaliados a partir do princípio do trabalho e energia. Seja uma viga biapoiada sujeita a um impacto de um bloco de massa  $m_I$  conforme ilustrado na Figura 3.1.

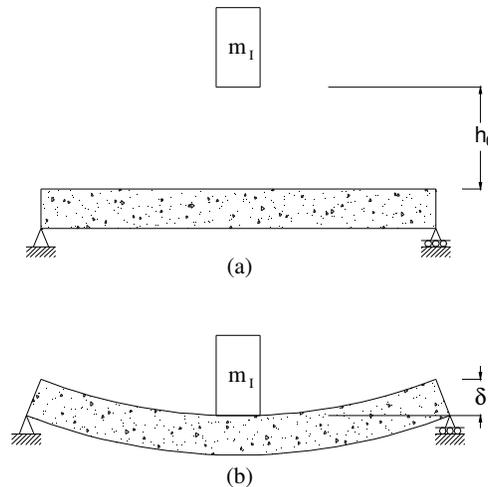


Figura 3.1 – Carregamento de impacto em viga biapoiada.

Como o bloco parte do repouso, inicialmente tanto a energia cinética como a energia de deformação são nulas. No momento em que o bloco é liberado em queda livre, Figura 3.1(a), sua energia potencial gravitacional é transformada em energia cinética. Quando a viga atinge sua deflexão máxima, Figura 3.2(b), a energia cinética é transformada em energia de deformação, se tornando nula novamente. Neste instante, podemos igualar a energia de deformação da viga ao trabalho realizado pelo peso do bloco.

Durante a deformação da viga surgem forças de inércia com grande influência na ação de impacto. Desta forma, quanto maior a altura de queda, maior a velocidade do martelo no instante do impacto, e maiores as forças de inércia que surgem contrárias ao movimento da viga, implicando num aumento da resistência da viga ao carregamento de impacto.

No caso de vigas de concreto armado, torna-se difícil estabelecer teoricamente uma lei que relacione a velocidade do bloco durante o impacto e a magnitude da força de inércia, principalmente devido à redução da rigidez da viga causada pela fissuração durante o carregamento de impacto.

Deve-se considerar também que certa quantidade de energia é dissipada devido à fissuração do concreto e o escoamento da armadura. No caso de vigas

reforçadas, as lâminas de CFC armazenam energia durante sua deformação, sendo esta energia liberada quando ocorre a ruptura por tração ou devido a processos de descolamento ou delaminação das mesmas.

Uma investigação experimental nas regiões de contato de vigas com o martelo e com os apoios, realizada por HUGHES e DAFIRY (1995) indicou que a absorção de energia nestas regiões pode ser aceitavelmente desconsiderada para muitas situações práticas de vigas sob carregamento de impacto.

A forma geométrica e o material do impactor têm uma forte influência na resposta dos ensaios. Os resultados da pesquisa de BARR et al. (1990) mostraram que martelos mais pesados são mais eficientes do que martelos leves na transmissão de energia para os espécimes ensaiados.

JEROME e ROSS (1997) explicam que a força de reação medida no primeiro meio período pela célula de carga localizada no martelo consiste em duas parcelas. A primeira é a força de impacto induzida diretamente pela queda do martelo, enquanto que a segunda parcela é a força de inércia produzida pela vibração da viga. Após o primeiro meio período a força é causada somente pela força de inércia.

### **3.2. Comportamento do Concreto sob Carregamento de Impacto**

Ensaio em escala real podem ser caros e demandar muito tempo. No entanto a execução de ensaios em estruturas em escala reduzida pode apresentar comportamento diferente da estrutura em escala real. As dimensões de espécimes de concreto têm influência em seu comportamento. Este fenômeno é conhecido como “*size effect*”.

O problema de estruturas em escala, sob carregamento de impacto, causado pelo efeito da taxa de deformação foi estudado por OSHIRO e ALVES (2004), utilizando a propriedade da correção da velocidade de impacto. A técnica relaciona o uso de uma base alternativa de dimensionamento, junto com um modelo matemático o qual permite o cálculo do fator de correção da velocidade de impacto. Esta nova velocidade, quando aplicada no modelo, assegura a satisfação das leis de escala.

O “*size effect*” também foi verificado por KRAUTHAMMER et al. (2003) em um estudo numérico e experimental em cilindros de concreto de alta resistência de diferentes tamanhos submetidos à impacto axial. Os resultados mostraram a existência do “*size effect*” para os ensaios estáticos e dinâmicos. No geral, com o aumento do tamanho do espécime, a resistência do concreto diminuiu.

GEORGIN e REYNOUARD (2003) explicam que a velocidade de propagação das ondas de tensão depende da rigidez do material, a qual é dada pelas leis constitutivas do material. Do ponto de vista do material, o concreto apresenta um aumento de rigidez com o aumento da taxa de deformação, um fenômeno chamado de “*strain rate effect*”. Acredita-se que o aumento da resistência para taxa de deformação de até  $1 \text{ s}^{-1}$  origina-se da presença de água livre (*Stefan Effect*), e para taxas de deformações acima de  $10 \text{ s}^{-1}$  origina-se de forças de inércia.

O comportamento do concreto submetido a carregamento de tração uniaxial de impacto foi investigado experimentalmente por ZIELINSKI et al. (1981). Os resultados mostraram notável aumento da resistência à tração devido a alta taxa de tensão. A relação entre resistência à tração de impacto e estática variou entre 1,33 e 2,34 para vários traços de concreto. A alta taxa de tensão resultou em um aumento do módulo de elasticidade em tração uniaxial.

Verificou-se também que a resistência ao impacto de tração uniaxial do concreto é maior para concretos cujo diâmetro máximo do agregado é menor, assim como para espécimes ensaiados na direção perpendicular a direção em que foram moldados. A migração da água no concreto fresco produz zonas de ligação pobres e vazios abaixo das partículas dos agregados. Assim a diminuição do tamanho máximo do agregado corresponde a um aumento da área de superfície de agregado e então diminuição da exsudação.

ZIELINSKI et al. (1981) explicam que em ensaios de carregamento de impacto, muita energia é introduzida no espécime em um curto período de tempo, e as fissuras são forçadas a se desenvolver em um menor caminho de maior resistência, através de regiões do concreto mais resistentes e partículas de agregado, o que resulta em maior resistência do material. Ainda, a alta resistência causa extensiva micro-fissuração em outras áreas, o que leva a maiores deformações do que observado em ensaios estáticos, resultando em maior energia absorvida em ensaios dinâmicos do que estáticos.

Visto que o comportamento do concreto armado e a correspondente curva tensão-deformação sob carregamento estático são bem compreendidos, a realização de um método para projeto para carregamento de impacto pode ser facilitada se a capacidade de absorção de energia de uma viga de concreto armado sob carregamento de impacto puder ser relacionado com a energia de absorção de uma viga idêntica sob carregamento estático (HUGHES e DAFIRY, 1995).

### **3.2.1. Concreto com adições de fibras**

Diversas pesquisas têm mostrado o bom desempenho da adição de fibras no concreto, quanto ao carregamento devido ao impacto. Segundo WANG et al. (1996), um dos benefícios do concreto reforçado com fibras é que sua resistência ao impacto é significativamente maior do que para concreto simples.

Em pesquisa do comportamento de vigas de concreto com fibras sob carregamento de impacto, WANG et al. (1996) verificaram que a adição de fibras no concreto para volumes de até 0,5% conduziu a um pequeno aumento da energia de fratura, no entanto para volumes de fibras acima de 0,75% houve um grande incremento na energia de fratura. Para 0,5% de fibras de polipropileno o aumento foi de aproximadamente 22%, enquanto que para o mesmo volume de adição de fibras de aço o aumento foi de aproximadamente 41%. Dois mecanismos de ruptura foram observados. Abaixo do volume crítico observou-se a ruptura das fibras, enquanto que para volumes acima do crítico observou-se o arrancamento das fibras. O volume crítico de fibras de aço situou-se entre 0,5% e 0,75%.

Da mesma forma, os resultados da pesquisa realizada por MINDESS e VONDRAN (1988), sobre o comportamento de vigas de concreto com fibras sob carregamento de impacto, indicaram acréscimo de cerca de 40% na resistência ao impacto enquanto a energia de fratura aproximadamente dobrou, com a adição de fibras de polipropileno.

MINDESS et al. (1986) pesquisaram o comportamento, sob carregamento de impacto, de vigas de concreto armado com fibras adicionadas ao concreto, e verificaram que a adição de fibras de polipropileno tem pouca influência no

comportamento das vigas sob carregamento estático, porém apresenta grande influência na ductilidade das vigas sob carregamento de impacto.

Quando comparado o efeito da adição de fibras de polipropileno no comportamento de vigas de concreto armado confeccionadas com concreto de normal e alta resistências, MINDESS et al. (1986) verificaram que as vigas confeccionadas com concreto de alta resistência apresentam maior sensibilidade à adição de fibras. Assim, a adição de fibras em concretos de alta resistência parece ser uma eficiente forma de compensar o comportamento frágil destes concretos sob carregamento de impacto.

### **3.3. Estudos sobre carregamento dinâmico relacionados a materiais compósitos**

A seguir são apresentados alguns estudos relacionados ao comportamento de materiais compósitos aplicados em elementos de concreto sob carregamento dinâmico.

Pode-se constatar que a aplicação de reforço de materiais compósitos em vigas de concreto, sujeitas a carregamento de impacto, aumenta a capacidade destes elementos de resistir ao carregamento e ainda reduz a deflexão máxima, a abertura e o número de fissuras. Quanto maior a taxa de aplicação de carga, maior a força máxima de reação, o deslocamento máximo e a absorção de energia, enquanto que o modo de ruptura e a fissuração das vigas não são diretamente afetados.

#### **3.3.1. Estudo de WHITE et al. (2001)**

A influência da velocidade de carregamento em vigas de concreto armado reforçadas com PRFC (polímero reforçado com fibras de carbono) foi pesquisada por WHITE et al. (2001). As vigas foram ensaiadas em equipamento com controle da taxa de deslocamento. A Figura 3.2 ilustra as dimensões das vigas ensaiadas e a armadura empregada. As vigas foram confeccionadas com concreto cuja resistência aos 28 dias foi de 45,6 MPa à compressão e de 3,3 MPa à tração.

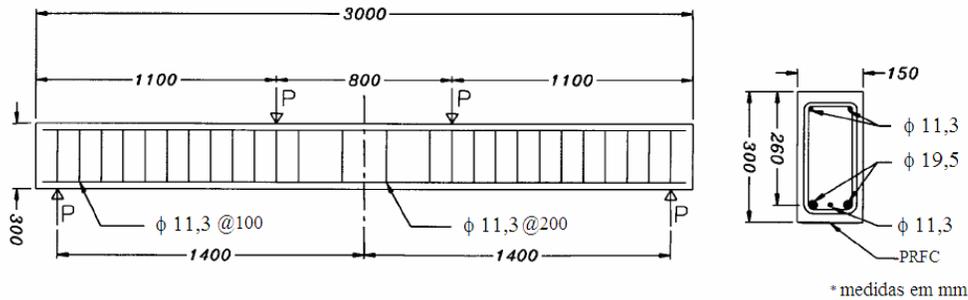


Figura 3.2 – Características dos espécimes ensaiados por WHITE et al. (2001).

Para o reforço das vigas foram utilizados dois tipos de PRFC. Reforço de chapas pultrudadas, com 50 mm de largura e 1,2 mm de espessura, resistência máxima de 2.400 MPa e módulo de elasticidade de 155 GPa, e reforço com laminados pré-impregnados, com 135 mm de largura e espessura de projeto de 0,11 mm, resistência máxima de 3.000 MPa e módulo de elasticidade de 160 GPa.

Os tipos de carregamento adotados foram os seguintes:

- Carregamento lento até a ruptura (taxa de deformação de  $10^{-6}$ /s);
- Carregamento rápido até a ruptura (taxa de deformação de  $10^{-3}$ /s);
- Carregamento lento até 150kN (carga de ruptura teórica da viga não reforçada), seguido de carregamento rápido até a ruptura;
- 12 ciclos de carregamento rápido até 120kN (80% carga de ruptura teórica da viga não reforçada), seguido de carregamento rápido até a ruptura;

Observou-se que o aumento da taxa de carregamento implicou em um aumento de quase 5% da resistência, rigidez e absorção de energia. A magnitude deste aumento depende da quantidade de reforço de PRFC, da armadura e do modo de ruptura. No entanto, a ductilidade e o modo de ruptura não foram diretamente afetados pela alteração da taxa de carregamento.

O tipo de carregamento, monotônico crescente ou com pré-ciclos de carga e descarga, não afetou a resistência das vigas, porém as vigas ensaiadas com pré-ciclos de carga e descarga apresentaram 10% de acréscimo da rigidez de serviço e 10% de perda da absorção de energia. A alta taxa de deformação e os pré-ciclos de carga e descarga não influenciaram a fissuração das vigas.

### 3.3.2. Estudo de ERKI E MEIER (1999)

Esses autores realizaram um estudo experimental do desempenho de vigas de concreto armado sob carregamento de impacto, reforçadas com laminados de PRFC e compararam com resultados obtidos em ensaios similares, com vigas reforçadas com chapas de aço coladas externamente (WEDER e LADNER, 1981; AMMANN et al, 1982; AMMANN 1983).

O carregamento de impacto foi induzido pelo levantamento de uma das extremidades da viga simplesmente apoiada e liberação de alturas pré-estabelecidas, conforme ilustrado na Figura 3.3. O dimensionamento do reforço de PRFC foi realizado de forma a fornecer aproximadamente a mesma resistência total à tração dada pela tensão de escoamento das chapas de aço utilizadas no reforço das vigas de referência.

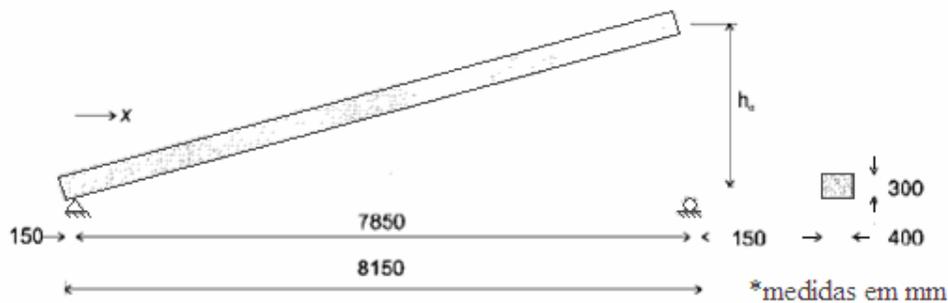


Figura 3.3 – Características dos espécimes ensaiados por ERKI e MEIER (1999).

Os resultados mostraram que as vigas reforçadas com PRFC apresentam bom desempenho ao impacto, no entanto a absorção de energia das vigas com este tipo de reforço foi inferior a das vigas reforçadas com placas de aço. Os autores explicam que devido as vigas reforçadas com PRFC apresentarem ruptura prematura ocasionada pelo descolamento do reforço, a execução de ancoragem adicional poderia melhorar a resistência das vigas reforçadas com PRFC.

O comportamento das vigas foi modelado através da equação do movimento. A Figura 3.3 mostra o movimento de corpo rígido de uma viga, cuja extremidade é liberada de uma altura  $h_0$ . A massa por unidade de comprimento é assumida como constante ao longo do comprimento da viga. O amortecimento do sistema não é considerado, e para simplificar a análise da resposta dinâmica de uma viga que tem sua rigidez variando no tempo e ao longo do eixo da viga, o

valor da rigidez foi assumido constante, para o qual é adotado o módulo de elasticidade da seção no estado limite último.

### 3.3.3. Estudo de TANG e SAADATMANESH (2003)

TANG e SAADATMANESH (2003) realizaram uma investigação experimental a fim de estudar os efeitos do carregamento de impacto em vigas de concreto armado reforçadas com polímeros laminados. Dois tipos de compósitos laminados, carbono e kevlar, foram colados nas faces superior e inferior das vigas com epóxi, visto que por causa da vibração induzida pelo carregamento de impacto, ambas as faces das vigas sofreram tensões cíclicas de tensão e compressão.

O concreto utilizado na execução das vigas apresentou resistência à compressão de 27,6 GPa, e módulo de elasticidade inicial de 24,9 MPa. A tensão de escoamento das barras de aço foi de 275,8 MPa, e módulo de elasticidade de 200 GPa. As propriedades físicas e mecânicas dos compósitos laminados utilizados no reforço das vigas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas dos compósitos laminados.

Compósito	Espessura (mm)	Peso (g/m <sup>2</sup> )	Deformação Última	Resistência Última (N/mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Carbono	0,67	599	0,014	1.035	85,7
Kevlar	0,43	307	0,017	460	37,6

A configuração do ensaio é ilustrada na Figura 3.4. Para induzir o carregamento de impacto, um martelo cilíndrico de aço com 222 N de massa foi liberado sob a face superior das vigas, de varias alturas de queda.

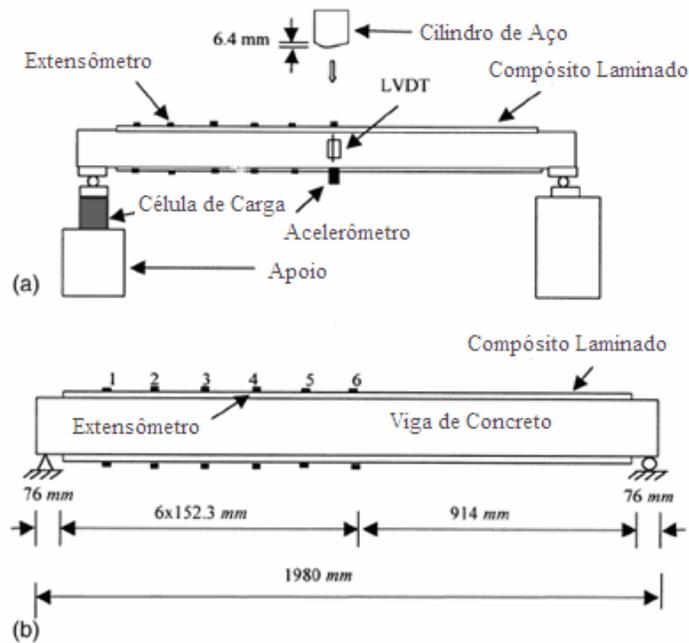
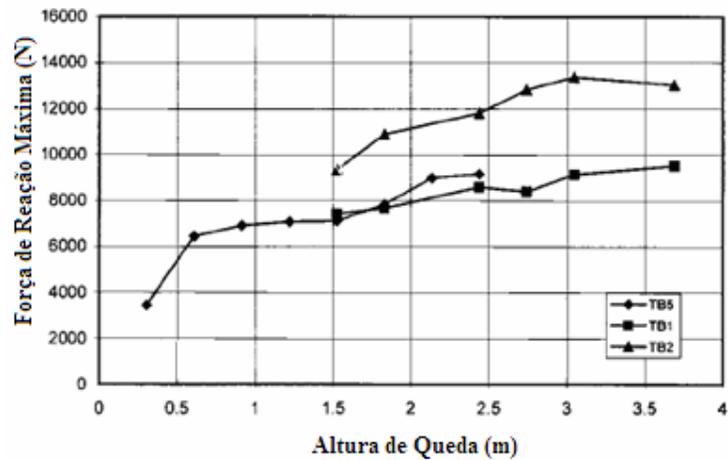


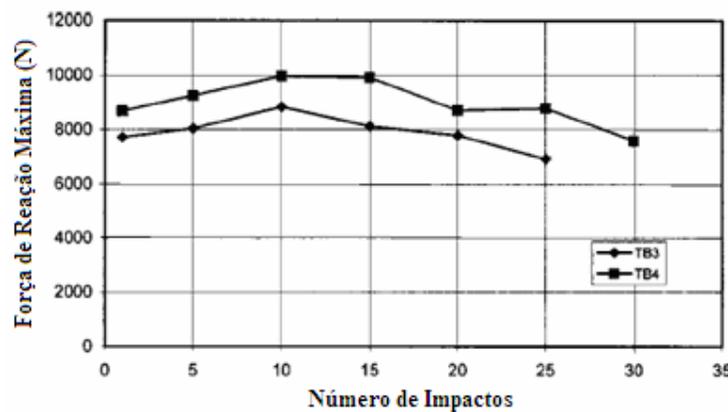
Figura 3.4 – Esquema de ensaio utilizado por TANG e SAADATMANESH (2003).

As vigas TB1 e TB3 foram reforçadas com laminas de kevlar, as vigas TB2 e TB4 foram reforçadas com laminas de carbono e a viga TB5 não recebeu reforço. As vigas TB1, TB2 e TB5 foram ensaiadas com quedas sucessivas do martelo de alturas crescentes, enquanto que as vigas TB3 e TB4 foram ensaiadas com quedas sucessivas do martelo com altura fixada em 1,52m.

As Figuras 3.5 e 3.6 mostram a força máxima de reação e o deslocamento máximo das vigas, respectivamente. Com o aumento da altura de queda do martelo, a força máxima de reação e o deslocamento máximo aumentam, enquanto que com o aumento do número de quedas do impactor com altura de queda constante, a força de reação diminui e o deslocamento aumenta, devido à perda de rigidez da viga com o aumento da fissuração.



a)

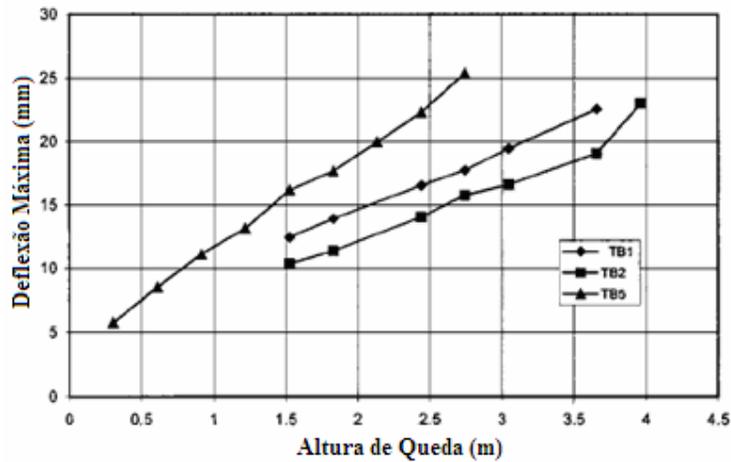


b)

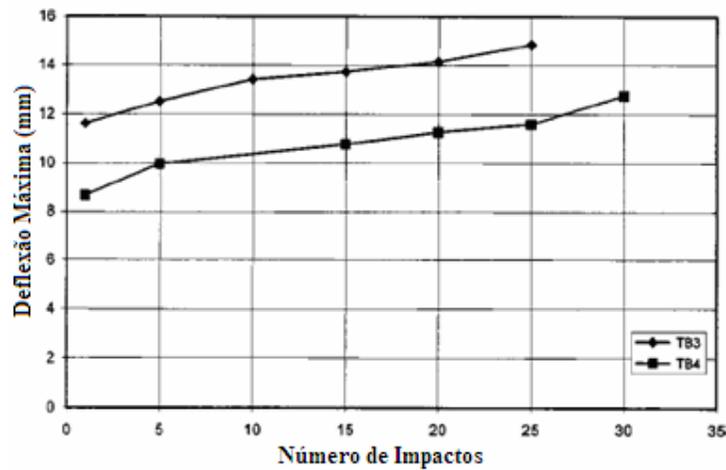
Figura 3.5 – a) Gráfico força de reação máxima vs altura de queda do martelo; b) Gráfico força de reação máxima vs número de impactos; obtido por TANG e SAADATMANESH (2003).

As vigas reforçadas com compósitos laminados de fibras de carbono apresentaram maior força de reação e menor deflexão, devido principalmente a maior rigidez conferida à viga por este tipo de reforço.

Os autores concluíram que os compósitos laminados aumentam significativamente a capacidade das vigas de concreto armado de resistir ao carregamento de impacto e reduzem a deflexão máxima. O ganho da capacidade depende do tipo, espessura, peso, e resistência do compósito laminado. Segundo TANG e SAADATMANESH (2003), a aplicação do reforço pode diminuir efetivamente a abertura e o número de fissuras sob carregamento de impacto, e desta forma, conferir um incremento na resistência ao esforço cortante da viga.



a)



b)

Figura 3.6 – a) Gráfico deflexão máxima vs altura de queda do martelo; b) Gráfico deflexão máxima vs número de impactos; obtido por obtido por TANG e SAADATMANESH (2003).

### 3.3.4. Estudo de TANG e SAADATMANESH (2005)

Em continuidade ao estudo anterior, TANG e SAADATMANESH (2005) analisaram a resposta de 27 vigas de concreto para investigar o comportamento de vigas reforçadas com compósitos laminados. Os resultados revelaram que a aderência entre reforço e substrato tem grande influência no desempenho deste tipo de estrutura para resistir carregamento de impacto.

Além disso, o reforço aumenta a resistência à fissuração e a flexão, assim como a rigidez residual das vigas. É reduzido o número de fissuras, abertura das

fissuras e a deflexão máxima. A rigidez residual de uma viga com reforço após o primeiro impacto foi de 2 a 3 vezes maior do que aquela não reforçada, e a máxima deflexão diminuiu de 30 a 40%. Os resultados dependem do tipo e peso do compósito laminado.

Comparado com os resultados dos ensaios estáticos, a deflexão última, o número de fissuras e a abertura das fissuras foram menores nos ensaios dinâmicos, contudo a máxima força de reação foi de 3 a 4 vezes maior do que sob carregamento estático.

As vigas reforçadas com laminados de kevlar apresentaram maior rigidez residual do que aquelas reforçadas com laminados de carbono sob a mesma energia de impacto. Isto confirma os efeitos benéficos do kevlar quando o interesse é a absorção de energia.

TANG e SAADATMANESH (2005) propõem o cálculo da força de impacto a partir de uma equação semi-empírica e uma equação para o cálculo da deflexão da viga sob carregamento de impacto, baseada na *flexural wave theory*.

### Cálculo da Força de Impacto

Do equilíbrio das forças no diagrama de corpo-livre, desprezando a não-linearidade geométrica e a massa da estrutura, e considerando que o martelo e a viga deslocam-se juntos imediatamente após o contato, o modelo pode ser simplificado a um sistema com um grau de liberdade definido pela seguinte equação do movimento:

$$m_I \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + K_{bs} \cdot \delta = 0 \quad (3.1)$$

onde,

$m_I$  - massa do martelo;

$\delta$  - deslocamentos do martelo e da viga;

$K_{bs}$  - é a rigidez linear da viga;

As condições iniciais são expressas no instante em que ocorre o contato entre o martelo e a viga ( $t = 0$ ):

$$\frac{\partial \delta}{\partial t}(0) = \dot{\delta}; \delta(0) = 0 \quad (3.2)$$

onde  $\dot{\delta}$  é a velocidade inicial do impactor no instante do impacto.

Aplicando as condições iniciais, temos a solução da equação (3.9):

$$\delta = \frac{\dot{\delta}}{\omega} \sin \omega t \quad (3.3)$$

onde  $\omega^2 = \frac{K_{bs}}{m_I}$ .

Desta forma, a força de contato pode ser expressa por:

$$F_I = K_{bs} \cdot \delta = \dot{\delta} \cdot (K_{bs} \cdot m_I)^{1/2} \sin \omega t \quad (3.4)$$

A expressão (3.4) desconsidera a redução da rigidez da viga durante o impacto devido à fissuração. Baseado nos resultados, a equação (3.4) é modificada com a adoção de uma constante para incorporar os efeitos da redução da rigidez. A força de contato pode ser expressa então por:

$$F_I = K_{bs} \cdot \delta = \frac{\dot{\delta} \cdot (K_{bs} \cdot m_I)^{1/2}}{1,45} \sin \omega t \quad (3.5)$$

Neste estudo a constante foi calculada como sendo a média da relação entre a força máxima medida no primeiro impacto no ensaio das vigas e a força de impacto calculada a partir da expressão (3.4), obtendo-se o valor de 1,45 para a constante.

### Cálculo da deflexão sob carregamento de impacto

A manipulação da equação do movimento da viga sob carregamento de impacto pode ser realizada utilizando a teoria da onda de flexão:

$$\frac{\partial^4 \delta}{\partial x^4} + \frac{1}{(EI/\bar{m})^2} \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = \frac{1}{EI} F_I(x, t) \quad (3.6)$$

onde,

$\delta$  - flecha da viga;

$x$  - coordenada ao longo do eixo da viga a partir do apoio;

$EI$  - rigidez da viga;

$\bar{m}$  - massa por unidade de comprimento da viga;

$F_I(x, t)$  - força de impacto.

A força de impacto é uma função do local do impacto ao longo do eixo longitudinal da viga e do tempo. Para o caso de carregamento de impacto no meio do vão, a equação (3.6) pode ser tomada como sendo:

$$\delta(x,t) = \frac{2 \cdot F_I}{mL} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{(n-1)/2} \sin \beta_n x \sin \omega_n t}{\omega_n} \quad (3.7)$$

onde,

$n$  - modo de vibração;

$L$  - comprimento da viga;

$\beta_n$  - é dado por  $(n\pi / L)$ ;

$\omega_n$  - é dado por  $\left( n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \right)$ .

### 3.3.5.

#### Estudo de JEROME e ROSS (1997)

JEROME e ROSS (1997) simularam a resposta dinâmica de vigas de concreto reforçadas externamente com PRFC num estudo experimental com vigas de concreto em escala reduzida ensaiadas com carregamento de impacto. As vigas não tinham armadura interna, mas foram reforçadas externamente, na face inferior, com uma, duas e três camadas de PRFC. Algumas vigas também receberam reforço nas faces laterais, além da face inferior, com três camadas de PRFC.

As vigas de concreto, com dimensões 7,62 x 7,62 x 76,2 cm, foram ensaiadas com carregamento quase-estático e com carregamento de impacto, através de um martelo com 43,7 kg liberado em queda livre. A maior altura de queda utilizada neste estudo foi de 0,61m.

Os resultados indicaram que o pico da carga aplicada aumenta com o aumento da altura de queda do martelo, com o aumento concomitante do pico da força de inércia e carga resistida. Com o aumento da rigidez das vigas devido ao aumento do número de placas de reforço, a relação entre o pico de carga estático e o pico de carga dinâmico, para uma dada altura de queda, diminui.

Para vigas de concreto sem reforço, o máximo deslocamento diminui com o aumento da altura de queda. Contudo, para vigas reforçadas, o deslocamento

aumenta com o aumento da altura de queda. Foi observado também que concreto de alta resistência se comporta de forma mais frágil dinamicamente, que quando estaticamente.

Para medir a quantidade de energia consumida pela viga até sua ruptura, foi construída a curva *carga vs tempo* juntamente com a curva *deslocamento vs tempo*, obtendo a curva dinâmica *carga de flexão vs deslocamento*. A área sob esta curva foi obtida por integração numérica resultando na curva dinâmica *energia de flexão vs tempo*.

Os resultados mostram um aumento da energia de flexão com o aumento da taxa de carregamento. Os autores explicam que maiores taxas de carregamento propagam as fissuras mais rapidamente, portanto a região do processo será maior. O aumento da micro-fissuração pode explicar o aumento da energia de flexão registrada com o aumento da altura de queda ou taxa de carregamento.

A energia de flexão dinâmica é maior que a energia de flexão estática para vigas de concreto sem reforço. Contudo, para as vigas com reforço externo a energia de flexão dinâmica é menor que a energia de flexão estática. Os autores explicam que a aplicação do reforço externo aumenta a rigidez da viga, sendo assim, aumentando o comportamento frágil da viga quando carregada dinamicamente. O pico de carga dinâmica foi cerca de 2-3 vezes maior que o pico de carga estática. Isto indica que o deslocamento é um fator limitador na determinação da energia de flexão dinâmica da viga, o que implica que para uma dada altura de queda, isto é, taxa de deformação, a viga tem uma capacidade fixa de absorção de energia, imposta pela resistência do concreto e limitada pelo deslocamento, desta forma, enfatizando a natureza frágil do concreto.

Também é evidente a duração do pulso da carga aplicada diminuir com o aumento da altura de queda. A média dos picos de carga de flexão foi sempre menor para ensaios estáticos, comparado com ensaios dinâmicos. Os autores atribuem o aumento do pico de carga de flexão com a altura de queda do martelo aos efeitos da taxa de deformação no concreto. Os picos de deslocamento dinâmico foram sempre menores quando comparado sob carregamento estático.

O modo com que as vigas romperam em ensaios dinâmicos não sofreu alterações apreciáveis quando comparado com os ensaios estáticos.