# 5 Apresentação e Análise dos Resultados

#### 5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios das 18 vigas. Conforme definido no item 4.3, as vigas foram classificadas em três grupos: Grupo A, formado por vigas sem reforço, Grupo B, formado por vigas com uma camada de CFC e Grupo C, formado por vigas com duas camadas de CFC.

Os resultados dos ensaios foram analisados separadamente para cada grupo de vigas, para a verificação do efeito da taxa de carregamento, assim como, os resultados obtidos para os exemplares de cada grupo, submetidos à mesma altura de queda do martelo, para se verificar o efeito da taxa de reforço.

#### 5.2. Ensaios Estáticos

O modo de ruptura da viga sem reforço, VEA, foi caracterizado pelo escoamento da armadura longitudinal de tração, seguido do esmagamento do concreto no banzo comprimido. Para as vigas reforçadas, VEB e VEC, o modo de ruptura foi caracterizado pelo escoamento da armadura longitudinal de tração seguido da ruptura do reforço longitudinal e do esmagamento do concreto no banzo comprimido (ver Figura 5.1).



a)



b)



c)

Figura 5.1 – Ruptura em ensaio estático das vigas: a) VEA; b) VEB; c) VEC.

As ancoragens transversais em CFC foram eficazes, evitando a ocorrência de ruptura prematura por delaminação do cobrimento de concreto ou por descolamento do reforço longitudinal de CFC. Somente o trecho compreendido entre as duas ancoragens transversais centrais apresentou descolamento do reforço longitudinal do substrato de concreto, conforme ilustra a Figura 5.2.



Figura 5.2 – Ruptura do reforço longitudinal de CFC da viga VEC.

As cargas máximas observadas nos ensaios estáticos foram superiores em 53%, 34% e 28%, para as vigas VEA, VEB e VEC, respectivamente, aos valores teóricos obtidos segundo os critérios de dimensionamento apresentados no item 2.2.1. Na Tabela 5.1 apresentam-se os resultados práticos e teóricos para os ensaios estáticos.

	Prático				Teórico				
Espécime	Reação Máxima (kN)	<b>E</b> <sub>c</sub> (%)	E <sub>st</sub> (%)	E <sub>f</sub> (%)	Reação Máxima (kN)	<b>E</b> <sub>c</sub> (%)	E <sub>st</sub> (%)	E <sub>f</sub> (%)	Reação Máx. s/ Reforço (kN)
VEA	23,79	0,406	0,684	-	15,58	0,350	0,792	-	15,58
VEB	20,85	0,258	0,944	0,904	15,58	0,350	0,887	1,196	10,49
VEC	19,97	0,274	(a)	0,925	15,58	0,350	0,985	1,320	5,30

Tabela 5.1 – Resultados experimentais e teóricos dos ensaios estáticos.

(a) Houve perda de sinal do extensômetro, sendo a última leitura realizada em 0,846 % com a força de reação da viga em 16,77 kN.

A Tabela 5.1 mostra que a deformação específica de ruptura do CFC ficou abaixo da deformação específica média de ruptura da fibra de carbono, de 1,276%, obtida nos ensaios de tração do material compósito. Comparando os valores de reação máxima das vigas obtidos nos ensaios com os valores teóricos das mesmas vigas sem o reforço, verifica-se que a aplicação do reforço à flexão de CFC aumentou a capacidade resistente das vigas em 99% e 277%, para as vigas VEB e VEC, respectivamente.

Os resultados confirmam a eficiência da técnica de reforço à flexão de vigas com CFC, no entanto, apesar dos resultados práticos ficarem acima dos teóricos, analisando a Tabela 5.1, pode-se verificar que esta diferença tende a diminuir com o aumento da taxa de reforço, devido principalmente à ruptura precoce do tecido de fibra de carbono, a qual não atinge a deformação específica determinada no dimensionamento do reforço das vigas.

A Figura 5.3 apresenta as curvas força de reação *vs* deformação específica para as vigas VEA, VEB e VEC, onde se observa os seguintes estágios de deformação da viga VEA:

- **Seção Não Fissurada**: Acréscimo da força de reação de apoio da viga sem deformação específica apreciável do aço da armadura longitudinal de tração, até a fissuração do concreto na região tracionada.

 - Seção Fissurada: Aumento da deformação do aço da armadura longitudinal de tração, com aumento proporcional da força de reação de apoio da viga (deformação elástica), até o escoamento do aço.

 - Escoamento do Aço: Aumento da deformação específica do aço da armadura longitudinal de tração com pequeno acréscimo da força de reação de apoio da viga (deformação plástica), até a ruptura do concreto no banzo comprimido.

A viga VEB apresenta regime de deformação linear após o escoamento da armadura longitudinal de tração, conforme mostra a Figura 5.3-b, em virtude do reforço de CFC continuar a reagir em regime elástico, no entanto, ocorre uma redução da inclinação da curva no ponto onde ocorre o escoamento do aço, visto o

mesmo passar a contribuir com valor praticamente constante. O mesmo comportamento pode ser observado para a viga VEC na Figura 5.3-c, porém a mudança de inclinação da curva é menor, devido a menor taxa de armadura longitudinal de tração nesta viga.

De acordo a Figura 5.3-c, a deformação específica do reforço de CFC mantém-se menor que a deformação específica do aço da armadura longitudinal de tração, em desacordo com o critério de dimensionamento adotado de compatibilidade de deformações.

Analisando a Figura 5.3 quanto à ductilidade energética das vigas, conforme os critérios de ductilidade apresentados no item 2.3.1 e baseado na deformação específica da armadura longitudinal de tração das vigas, pode-se observar que a relação entre a energia elástica e a energia total é maior para as vigas VEB e VEC do que para a viga VEA, visto a curva de deformação do aço das vigas reforçadas ser composta basicamente por dois segmentos lineares, implicando assim numa quantidade de energia inelástica praticamente desprezível, e consequentemente menor ductilidade para as vigas reforçadas.



Figura 5.3 – Curvas força de reação vs deformação específica: a) viga VEA; b) viga VEB; c) viga VEC.



Figura 5.3 – Curvas força de reação vs deformação específica: a) viga VEA; b) viga VEB; c) viga VEC (continuação).

#### 5.3. Ensaios Dinâmicos

O acionamento do mecanismo de liberação do martelo em queda livre não foi configurado para dar início à aquisição dos dados automaticamente, e desta forma, os ensaios foram realizados por duas pessoas. Como as leituras seriam realizadas na freqüência de 20.000 Hz, e visando facilitar a manipulação dos arquivos gerados, fixou-se a quantidade de 60.000 leituras, limitando o tempo de ensaio em 3 s, o que exigiu um bom sincronismo, por meio de comandos de voz, entre os operadores do ensaio.

Para a construção dos gráficos, os arquivos foram editados de forma a eliminar o período de leitura realizado entre o início impreciso da aquisição dos dados e o instante em que se observa o primeiro efeito sobre a viga, sendo este o ponto de partida para todos os gráficos dos ensaios dinâmicos. Portanto, a escala

do tempo nos gráficos Deformação vs. Tempo e Força de Reação vs. Tempo é a mesma para um dado ensaio.

A capacidade resistente de todas as vigas foi atingida para todas as alturas de queda do martelo. Nos ensaios das vigas V050DA, V100DA e V150DA do Grupo A e das vigas V050DB e V100DB do grupo B, observou-se um pequeno retorno do martelo após o primeiro impacto contra as vigas, seguido de vários impactos de pequena intensidade. Nas figuras apresentadas a seguir, os valores do tempo variam de zero até um valor imediatamente anterior ao segundo impacto. As demais vigas romperam completamente, atingindo o chão da área de ensaio no primeiro impacto.

## 5.3.1. Grupo A

As vigas pertencentes ao Grupo A apresentaram modo de ruptura caracterizado pelo escoamento da armadura longitudinal de tração e esmagamento do concreto no banzo comprimido (Figura 5.4).



Figura 5.4 – Ruptura das vigas: a) V050DA; b) V100DA; c) V150DA; d) V200DA; e) V250DA.



d)



e)

Figura 5.4 - Ruptura das vigas: a) V050DA; b) V100DA; c) V150DA; d) V200DA; e) V250DA (continuação).

A Figura 5.5 apresenta as curvas deformação específica vs tempo para as vigas do grupo A. Pode-se observar que para todas as vigas, no instante em que ocorre o esmagamento do concreto do banzo comprimido, a deformação específica da armadura longitudinal de tração apresenta uma súbita queda seguida de uma recuperação, passando a apresentar ainda um pequeno acréscimo para então decrescer.

A queda repentina da deformação específica do aço pode ser explicada pelo fato de que no instante em que ocorre a ruptura do banzo comprimido, uma das forças que constituem o binário resistente deixa de existir, resultando em alívio de esforço na armadura longitudinal de tração, o que implica em redução da deformação específica do aço. Após o alívio de esforços na armadura longitudinal de tração, o incremento de sua deformação específica ocorre devido ao dobramento da viga.

Os valores obtidos na ruptura do concreto no banzo comprimido são apresentados na Tabela 5.2



Figura 5.5 – Curvas deformação específica vs tempo das vigas: a) V050DA; b) V100DA; c) V150DA; d) V200DA; e) V250DA.



Figura 5.5 – Curvas deformação específica vs tempo das vigas: a) V050DA; b) V100DA; c) V150DA; d) V200DA; e) V250DA (continuação).

	Pico Máx	imo da	Ruptura do Concreto do Banzo				
	Força de Reação		Comprimido				
Espécime	Magnitude	Instante	Instante	$\mathcal{E}_{c}$	$\mathcal{E}_{st}$		
	(kN)	(s)	(s)	(%)	(%)		
V050DA	67,66	0,00405	0,01285	0,252	1,604		
V100DA	111,56	0,00460	0,00870	0,524	1,392		
V150DA	121,67	0,00450	0,00665	0,387	1,049		
V200DA	128,89	0,00505	0,00990	0,294	1,241		
V250DA	149,07	0,00475	0,00880	0,3731	0,182		

Tabela 5.2 – Valores obtidos nos ensaios das vigas do grupo A.

As curvas força de reação *vs* tempo, para o primeiro impacto das vigas do grupo A são apresentadas na Figura 5.6. Pode-se observar que ao longo do tempo, as forças de reação apresentam um comportamento inicial oscilatório com amplitudes decrescentes, tornando-se praticamente linear e constante, para então decrescer praticamente linearmente sua magnitude. O pico máximo da força de reação é atingido logo em seu primeiro intervalo ascendente, passando a assumir na seqüência, em seu intervalo descendente, magnitudes tão menores quanto maior for o pico máximo da força.



Figura 5.6 – Curvas força de reação vs tempo das vigas: a) V050DA; b) V100DA; c) V150DA; d) V200DA; e) V250DA.



Figura 5.6 – Curvas força de reação vs tempo das vigas: a) V050DA; b) V100DA; c) V150DA; d) V200DA; e) V250DA (continuação).

A força de reação para a viga V050DA (Figura 5.6-a), em seu intervalo de magnitude praticamente constante, apresenta valor muito próximo à força de reação na ruptura obtida no ensaio estático, apresentando valores menores para as vigas V100DA, V150DA, V200DA e V250DA, respectivamente, conseqüência do maior pico da força de reação atingida, e conseqüente diminuição da rigidez da viga.

Há um atraso entre o instante em que surgem as deformações nas vigas, instante zero, e o instante em que ocorrem as forças de reação. O fato de ocorrer deformações na viga sem que haja forças de reação nos apoios é devido à alta aceleração imposta à viga com o carregamento de impacto aplicado pelo martelo, fazendo com que surjam forças de inércia contrárias ao movimento. Desta forma, como as forças elásticas não se desenvolvem rápido o suficiente para manter o equilíbrio do sistema, por alguns milésimos de segundo, o equilíbrio fica por conta das forças de inércia.

### 5.3.2. Grupo B

O modo de ruptura das vigas foi caracterizado pelo escoamento da armadura longitudinal de tração, ruptura do reforço à flexão de CFC entre os laços centrais de ancoragem e esmagamento do concreto no banzo comprimido. A Figura 5.7 mostra as vigas após o ensaio de impacto.





d)



e)

Figura 5.7 – Ruptura das vigas: a) V050DB; b) V100DB; c) V150DB; d) V200DB; e) V250DB.

Como já mencionado anteriormente, observou-se nos ensaios das vigas V050DB e V100DB o ricocheteamento do martelo após o impacto com a viga. As vigas V150DB, V200DB e V250DB atingiram a deflexão máxima possível para o esquema de ensaio, apresentando ainda, ruptura das barras de aço da armadura longitudinal de tração (ver Figura 5.8).



Figura 5.8 – Ruptura das barras de aço da armadura longitudinal de tração da viga V150DB;

A Figura 5.9 apresenta as curvas deformação específica *vs* tempo para as vigas do grupo B. Observa-se o mesmo comportamento de perda e recuperação repentina da deformação específica do aço da armadura longitudinal de tração, observado nas vigas do grupo A, quando do esmagamento do concreto no banzo comprimido.



Figura 5.9 – Curvas deformação específica vs tempo das vigas: a) V050DB; b) V100DB; c) V150DB; d) V200DB; e) V250DB.



Figura 5.9 – Curvas deformação específica vs tempo das vigas: a) V050DB; b) V100DB; c) V150DB; d) V200DB; e) V250DB (continuação).

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos no instante da ruptura do reforço à flexão das vigas do grupo B. O reforço à flexão de CFC apresentou nos ensaios de impacto, média das deformações específicas de ruptura de 1,191 %, superior à obtida em ensaio estático de 0,904 %, e muito próxima à deformação específica de 1,196 % para o equilíbrio da seção, obtida no item 4.3.2.

Espécime	Pico Máxim de Re	io da Força ação	Ruptura do Reforço à Flexão de CFC				
	Magnitude	Instante	Instante	$\mathcal{E}_{c}$	$\mathcal{E}_{st}$	$\mathcal{E}_{f}$	
	(kN)	(s)	(s)	(%)	(%)	(%)	
V050DB	61,78	0,00470	0,01490	0,296	1,066	1,335	
V100DB	104,33	0,00460	0,00835	0,320	1,167	1,233	
V150DB	117,34	0,00470	0,00690	0,272	1,097	1,128	
V200DB	120,23	0,00495	0,00565	0,325	1,072	1,047	
V250DB	139,01	0,00500	0,00625	0,314	0,943	1,211	

Tabela 5.3 – Valores obtidos nos ensaios das vigas do grupo B.

As curvas força de reação *vs* tempo, para o primeiro impacto das vigas do grupo B são apresentadas na Figura 5.10.



Figura 5.10 – Curvas força de reação vs tempo das vigas: a) V050DB; b) V100DB; c) V150DB; d) V200DB; e) V250DB.



Figura 5.10 – Curvas força de reação vs tempo das vigas: a) V050DB; b) V100DB; c) V150DB; d) V200DB; e) V250DB (continuação).

## 5.3.3. Grupo C

As vigas do grupo C não apresentaram esmagamento do concreto do banzo comprimido, sendo o modo de ruptura destas vigas caracterizado pelo escoamento da armadura longitudinal de tração seguido da ruptura do reforço longitudinal de CFC. A Figura 5.11 apresenta as vigas após o ensaio de impacto.



a)

b)



d)



Figura 5.11 – Ruptura das vigas: a) V050DC; b) V100DC; c) V150DC; d) V200DC; e) V250DC.

Todas as vigas pertencentes a este grupo apresentaram a deflexão máxima para o esquema de ensaio adotado, atingindo o chão após o impacto do martelo. Assim, como não houve o esmagamento do concreto do banzo comprimido, com o aumento contínuo da deflexão da viga, após a ruptura do reforço longitudinal de CFC e do aço da armadura longitudinal de tração, a posição da linha neutra subiu a ponto de provocar a ruptura por tração do aço da armadura longitudinal de compressão. A Figura 5.12 mostra a seção transversal da viga V050DC após o ensaio.



Figura 5.12 - Ruptura das barras de aço da armadura longitudinal da viga V150DC.

Nas vigas V100DC, V150DC, V200DC e V250DC surgiram fissuras na face superior, com progressão perpendicular ao eixo longitudinal da viga, situadas entre o ponto de aplicação de carga e o apoio da viga, evidenciando o surgimento de momento fletor negativo, causado por forças de inércia que se desenvolveram devido à aceleração imposta pelo martelo durante o impacto. Para as vigas V110DC e V150DC, as fissuras surgiram próximo aos apoios das vigas, enquanto que para as vigas V200DC e V250DC além das fissuras próximas aos apoios, surgiram fissuras nas proximidades dos pontos de aplicação de carga. A Figura 5.13 mostra as fissuras na face superior das vigas V150DC e V200DC.



a)



b)

Figura 5.13 – Fissuras na face superior das vigas: a) V150DC; b)V200DC.

A Figura 5.14 apresenta as curvas deformação específica *vs* tempo para as vigas do grupo C. Visto não ocorrer o esmagamento do concreto do banzo comprimido destas vigas, o comportamento característico de queda e recuperação súbita da deformação específica do aço da armadura longitudinal de tração não é observado.



Figura 5.14 – Curvas deformação específica vs tempo das vigas: a) V050DC; b) V100DC; c) V150DC; d) V200DC; e) V250DC.



Figura 5.14 – Curvas deformação específica vs tempo das vigas: a) V050DC; b) V100DC; c) V150DC; d) V200DC; e) V250DC (continuação).

Verifica-se na Figura 5.14 que, assim como observado no ensaio estático, nos ensaios dinâmicos a deformação específica do reforço longitudinal de CFC, em um dado instante, tende a ser menor do que a deformação específica do aço da armadura longitudinal de tração, contrariando a hipótese de dimensionamento que considera que as seções transversais permanecem planas.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos no instante da ruptura do reforço à flexão para as vigas do grupo C. Com o aumento da altura de queda do martelo, pode-se verificar um aumento do pico máximo da força de reação da viga, assim como uma tendência de redução do intervalo de tempo para a ruptura do reforço longitudinal de CFC, enquanto que as deformações específicas do concreto, do aço da armadura longitudinal de tração e do reforço longitudinal de CFC não foram influenciadas.

Pico Máximo da Força Ruptura do Reforço à Flexão de CFC de Reação Espécime Magnitude Instante Instante  $\mathcal{E}_{f}$  $\mathcal{E}_{c}$  $\mathcal{E}_{st}$ (kN) (s) (s) (%) (%) (%) V050DC 62,74 0,00475 0,227 0,770 0,01230 0,824 V100DC 81.14 0.00540 0,00840 0,228 1,124 1.065 V150DC 109,35 0,00540 0,00695 0,230 1,270 0,918 V200DC 120,54 0,00535 0,00320 0,145 0,838 0,778 V250DC 126,14 0,00605 0,00600 0,280 1,181 0,709

Tabela 5.4 – Valores obtidos nos ensaios das vigas do grupo C.

As curvas força de reação *vs* tempo, para o primeiro impacto das vigas do grupo C são apresentadas na Figura 5.15. Observa-se que as vigas do grupo C apresentam comportamento distinto das vigas dos grupos A e B, visto não apresentarem o intervalo de tempo com magnitude da força de reação praticamente constante.



Figura 5.15 – Curvas força de reação vs tempo das vigas: a) V050DC; b) V100DC; c) V150DC; d) V200DC; e) V250DC.



Figura 5.15 – Curvas força de reação vs tempo das vigas: a) V050DC; b) V100DC; c) V150DC; d) V200DC; e) V250DC (continuação).

### 5.3.4. Comparação das Forças de Reação Máximas das Vigas

Realizou-se uma comparação das forças de reação máximas obtidas nos ensaios dinâmicos das vigas com as forças estimadas de acordo com TANG e SAADATMANESCH (2005) abordado no item 3.3.4. Os valores das forças de reação máximas teóricas para as vigas foram determinados pela expressão 3.4 e comparados com os resultados experimentais na Tabela 5.5. A rigidez linear das vigas foi aproximada pela seguinte expressão:

$$K_{bs} = \frac{48 \cdot E_{cs} \cdot I_{II}}{l^3} \tag{5.1}$$

onde:

 $I_{II}$  - momento de inércia da viga no Estádio II;

*l* - vão da viga;

$$E_{cs} = 0.85 \cdot 5600 \cdot f_c^{\frac{1}{2}}$$
(5.2)

onde,

 $f_c$  - resistência à compressão do concreto (*MPa*);

Grupo	Espécime	Força de Reação Máxima				
orupo	Lopeenine	Experimental (kN)	Teórica (kN)			
	V050DA	67,66	50,70			
	V100DA	111,56	71,70			
Α	V150DA	121,67	87,82			
	V200DA	128,89	101,40			
	V250DA	149,07	113,37			
	V050DB	61,78	45,33			
	V100DB	104,33	64,1			
В	V150DB	117,34	78,51			
	V200DB	120,23	90,66			
	V250DB	139,01	101,36			
	V050DC	62,74	36,21			
C	V100DC	81,14	51,21			
	V150DC	109,35	62,72			
	V200DC	120,54	72,43			
	V250DC	126,14	80,97			

Tabela 5.5 – Comparação das forças de reação máximas das vigas.

A média da relação entre a máxima força de reação teórica e experimental para as vigas dos grupos A, B e C foi de 0,73, 0,70 e 0,60, respectivamente, valores estes bastante distintos ao valor obtido de 1,45 por TANG e SAADATMANESCH (2005) em seu estudo.

#### 5.4. Efeito da Taxa de Carregamento

A Figura 5.16 apresenta as curvas força máxima de reação *vs* altura de queda do martelo para as vigas dos grupos A, B e C. Quanto maior a altura de queda do martelo maior é a força máxima de reação das vigas, sendo a magnitude

da força máxima de reação das vigas maior para as vigas do grupo A, seguidas das vigas dos grupos B e C. Observa-se que as curvas obtidas para as vigas dos grupos A e B apresentaram comportamento bastante semelhante.



Figura 5.16 - Curvas força máxima de reação vs altura de queda do martelo.

O efeito da taxa de carregamento está mostrado na Figura 5.17 onde se observa um crescimento praticamente linear da reação máxima de apoio com o aumento da taxa de carregamento, o qual pode ser aproximado pelas expressões (5.3), (5.4) e (5.5) obtidas pelo método dos mínimos quadrados para as vigas dos grupos A, B e C, respectivamente, com coeficiente de correlação de  $R^2 = 0,954$ ,  $R^2 = 0,979$  e  $R^2 = 0,988$ , respectivamente. Pode-se verificar que quanto maior a taxa de reforço, maior é a sensibilidade da reação máxima de apoio da viga com relação à taxa de carregamento aplicada.



Figura 5.17 - Curvas força máxima de reação vs taxa de carregamento.



Figura 5.17 - Curvas força máxima de reação vs taxa de carregamento (continuação).

$$R_{max} = 0,00049 \cdot TC + 28,88984 \tag{5.3}$$

$$R_{max} = 0,00053 \cdot TC + 24,61358 \tag{5.4}$$

$$R_{máx} = 0,00057 \cdot TC + 16,87557 \tag{5.5}$$

onde,

 $R_{max}$  - reação máxima de apoio da viga ( kN );

$$TC$$
 - taxa de carregamento  $(kN / s)$ .

A Figura 5.18 mostra as curvas força de reação vs tempo para as vigas dos grupos A e B que não atingiram a deflexão máxima para a configuração de ensaio

adotado. Pode-se verificar que quanto maior a altura de queda do martelo, maior é o tempo de duração da força de reação da viga, ou seja, maior é o tempo de desaceleração do martelo e consequentemente maior a deflexão da viga.



Figura 5.18 – Curvas força de reação vs tempo das vigas que não atingiram a deflexão máxima: a) grupo A; b) grupo B.

Para as vigas que atingiram a deflexão máxima para a configuração de ensaio adotada, pode-se observar na Figura 5.19 que, com o aumento da altura de queda do martelo reduziu-se o intervalo de tempo de reação, ou seja, devido a maior velocidade do martelo no instante do impacto com a viga, o intervalo de tempo necessário para a viga atingir a deflexão máxima diminui.



Figura 5.19 – Curvas força de reação vs tempo das vigas que atingiram a deflexão máxima: a) grupo A; b) grupo B; c) grupo C.

As curvas deformação específica do concreto *vs* tempo e deformação específica do reforço *vs* tempo são apresentadas conforme os grupos das vigas, no Anexo C - Figuras C.1 e C.2, respectivamente. Com o aumento da altura de queda do martelo, pode-se verificar uma tendência para a redução do intervalo de tempo

para a ruptura do concreto e do reforço à flexão de CFC, por causa da maior taxa de deformação imposta ao material, atingindo em menor tempo a ruptura.

Para a análise do efeito da taxa de carregamento na deformação específica do aço da armadura longitudinal de tração das vigas, a Figura 5.20 apresenta as curvas deformação específica do aço *vs* tempo para as vigas que não atingiram a deflexão máxima para o esquema de ensaio adotado.

Analisando a Figura 5.20, pode-se verificar que com o aumento da altura de queda do martelo, as vigas do grupo A apresentam uma diminuição da deformação específica do aço da armadura longitudinal de tração, condicionada à ruptura do concreto do banzo comprimido, implicando em diminuição da ductilidade. No entanto, as vigas do grupo B, mesmo com o aumento da altura de queda do martelo reduzindo o intervalo de tempo para a ruptura do concreto do banzo comprimido, o acréscimo da taxa de deformação garantiu o aumento da deformação específica do aço da armadura longitudinal de tração.



b)

Figura 5.20 – Curvas deformação específica do aço vs tempo das vigas que não atingiram a deflexão máxima: a) grupo A; b) grupo B.

As curvas deformação específica do aço *vs* tempo, das vigas que atingiram a deflexão máxima para o esquema de ensaio adotado, não apresentaram resultados conclusivos, e são apresentadas no Anexo C - Figura C.3.

#### 5.5. Efeito da Taxa de Reforço

A Figura 5.21 apresenta as curvas força de reação *vs* tempo das vigas dos grupos A, B e C, conforme a altura de queda do martelo.

Nas Figuras 5.21-a e 5.21-b, pode-se verificar que a duração total do intervalo de tempo de reação das vigas do grupo B é maior do que das vigas do grupo A. Como as vigas foram submetidas à mesma velocidade inicial do martelo no instante do impacto, o maior intervalo de tempo de reação representa menor capacidade da viga de desacelerar o martelo, exigindo consequentemente maior deflexão da viga. No entanto, para o caso das vigas do grupo C, o curto intervalo de tempo de reação está relacionado com a falência precoce da capacidade resistente da viga, fazendo com que a mesma viesse a atingir a deflexão máxima para a configuração do ensaio.



Figura 5.21 – Curvas força de reação vs tempo das vigas para altura de queda do martelo de: a) 0,50m; b) 1,00m; c) 1,50m; d) 2,00m; e) 2,50m.



Figura 5.21 – Curvas força de reação vs tempo das vigas para altura de queda do martelo de: a) 0,50m; b) 1,00m; c) 1,50m; d) 2,00m; e) 2,50m (continuação).

Nas Figuras 5.21-c, 5.21-d e 5.21-e, observa-se que o intervalo de tempo de reação é decrescente para as vigas dos grupos A, B e C, respectivamente, onde com exceção da viga V150DA, as demais vigas atingem a deflexão máxima para a configuração do ensaio. Assim, o aumento do intervalo de tempo de reação está relacionado com a maior capacidade da viga em desacelerar o movimento do martelo até que seja atingida a deflexão máxima.

As curvas de deformação específica do concreto, do aço e do reforço das vigas ao longo do tempo, segundo as alturas de queda do martelo, são apresentadas no Anexo C – Figuras C.4, C.5 e C.6, respectivamente. O comportamento dos materiais pouco se altera para as vigas dos grupos A e B, as quais se diferenciam das vigas do grupo C por estas não apresentarem ruptura do concreto do banzo comprimido.

Observa-se que no caso das vigas que não atingem a deflexão máxima para a configuração do ensaio, a ruptura do concreto das vigas do grupo A ocorre antes das vigas do grupo B. O intervalo de tempo para a ruptura do concreto está relacionado com a posição da linha neutra, que no caso das vigas do grupo A, as deformações teóricas no Estado Limite Último são menores do que para as vigas do grupo B, e assim sendo, o equilíbrio da seção é alcançado sob menor deflexão.