

4. Apresentação e Análise dos Resultados

4.1. Considerações Iniciais

Na investigação da influência da taxa de carregamento sobre a resistência de aderência entre o compósito de fibras de carbono (CFC) e o concreto é fundamental identificar o modo de ruptura, a força máxima na tira de fibras de carbono e o tempo de duração do carregamento. Nesta pesquisa o modo de ruptura relevante é o de aderência. A força máxima que causa esse modo de ruptura é necessária para o cálculo da resistência de aderência juntamente com o tempo de carregamento para o cálculo da taxa de carregamento.

Este capítulo se inicia com uma análise detalhada dos resultados dos ensaios com a finalidade de identificar a força que efetivamente provoca a ruptura da aderência. Em seguida são identificados os modos de ruptura, são calculadas as resistências de aderência, e finalmente é realizada a análise da influência da taxa de carregamento sobre a resistência de aderência entre o CFC e o concreto.

4.2. Interpretação dos Resultados

Conforme foi mostrado no capítulo 3, a carga aplicada no corpo-de-prova foi medida por uma célula de carga posicionada sobre o bloco de concreto suportado por uma tira de fibras de carbono, tal como reproduzido no modelo mostrado na Figura 4.1. Esse é um modelo com um grau de liberdade constituído de uma massa (bloco de concreto e célula de carga) e uma mola (compósito de fibras de carbono).

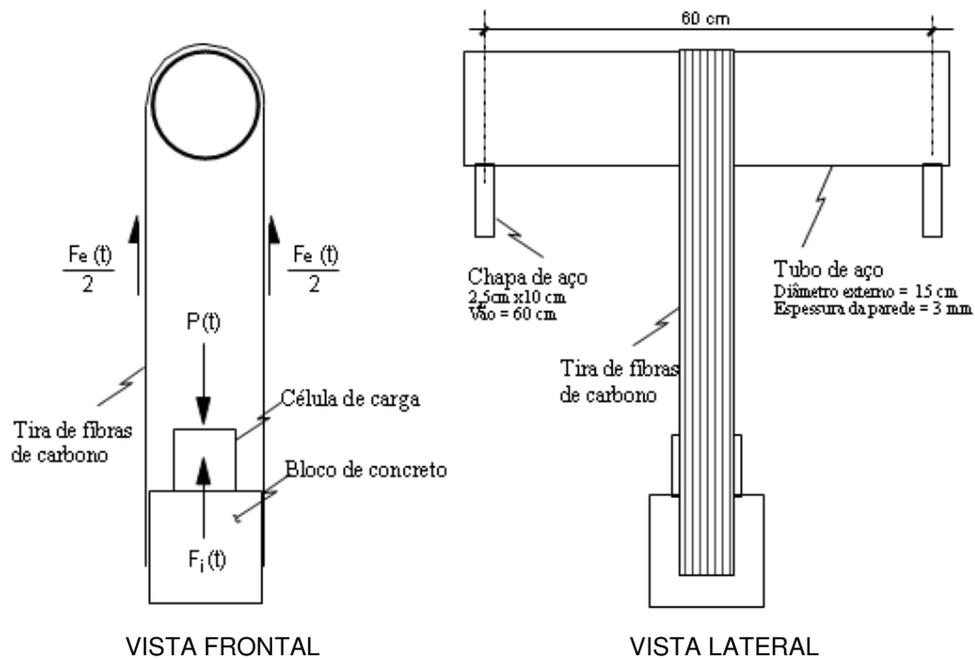


Figura 4.1 – Representação esquemática do sistema analisado.

A constante de rigidez da mola é determinada levando-se em consideração a rigidez axial da tira de carbono e a rigidez da estrutura na qual a tira de fibras de carbono se apóia. A constante k da rigidez global é obtida em função das rigidezes da tira de fibras de carbono e da estrutura de apoio pela equação:

$$\frac{1}{k} = \frac{u_f}{P} + \frac{u_e}{P} \quad (4.1)$$

onde u_f representa o deslocamento oriundo do alongamento da tira de fibras de carbono, u_e representa o deslocamento devido à deformação da estrutura e P a força aplicada.

As medições (estáticas) realizadas na estrutura forneceram:

- $\frac{u_e}{P} = 0,0096 \text{ cm/kN}$
- $\frac{u_f}{P} = 0,143 \text{ cm/kN}$

Então, o valor encontrado para a constante de rigidez global foi $k = 41,8 \text{ kN/cm}$.

Como a carga é aplicada abruptamente, o sistema de amortecimento não absorve uma quantidade significativa de energia da estrutura num curto intervalo de tempo. Assim, na análise dinâmica, considera-se a resposta do carregamento de impulso como não-amortecida. A equação de equilíbrio do sistema representado na Figura 4.1 é então:

$$F_i(t) + F_e(t) = P(t) \quad (4.2)$$

Sabendo-se que:

$$F_i(t) = m \ddot{u}(t) \quad (4.3)$$

$$F_e(t) = k u(t) \quad (4.4)$$

Tem-se:

$$m \ddot{u}(t) + k u(t) = P(t) \quad (4.5)$$

onde

$F_i(t)$ – força de inércia;

$F_e(t)$ – força elástica;

m – massa;

k – rigidez do sistema;

$\ddot{u}(t)$ – aceleração da massa;

$u(t)$ – deslocamento da massa;

$P(t)$ – carga impulsiva.

A massa do bloco de concreto é 8,5 kg e massa da célula de carga é 1,65 kg, então a massa do conjunto é igual a 10,15 kg.

Nas Figuras 4.2 a 4.11 são mostradas as cargas aplicadas e as deformações específicas medidas em dois ensaios estáticos e em três ensaios dinâmicos.

Nos ensaios estáticos a carga aplicada $P(t)$ cresce lentamente ao longo do tempo sem despertar as forças de inércia. As deformações medidas nas tiras de fibras de carbono também crescem lentamente e seus valores são compatíveis com as propriedades da tira (Figuras 4.2 a 4.5).

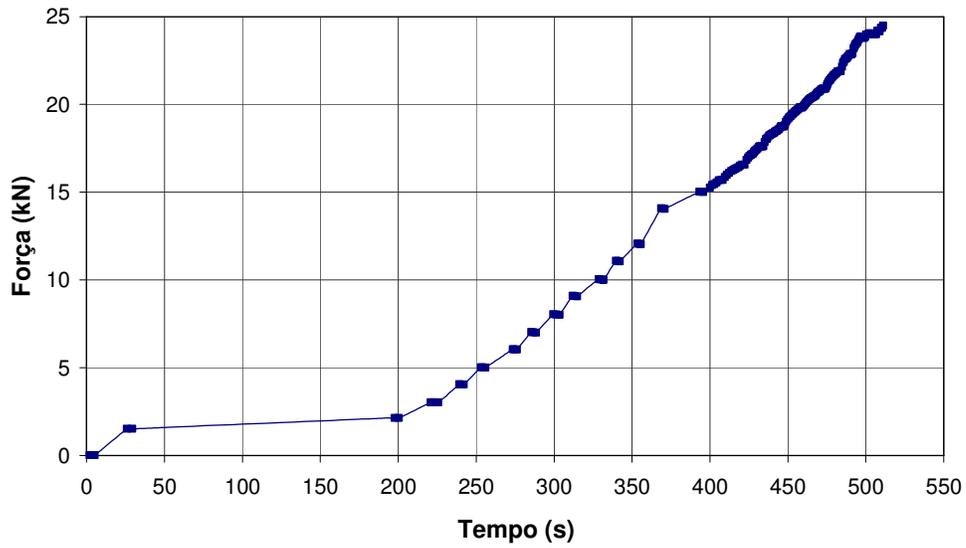


Figura 4.2 – Curva força aplicada vs. tempo para o corpo-de-prova B45-0-01.

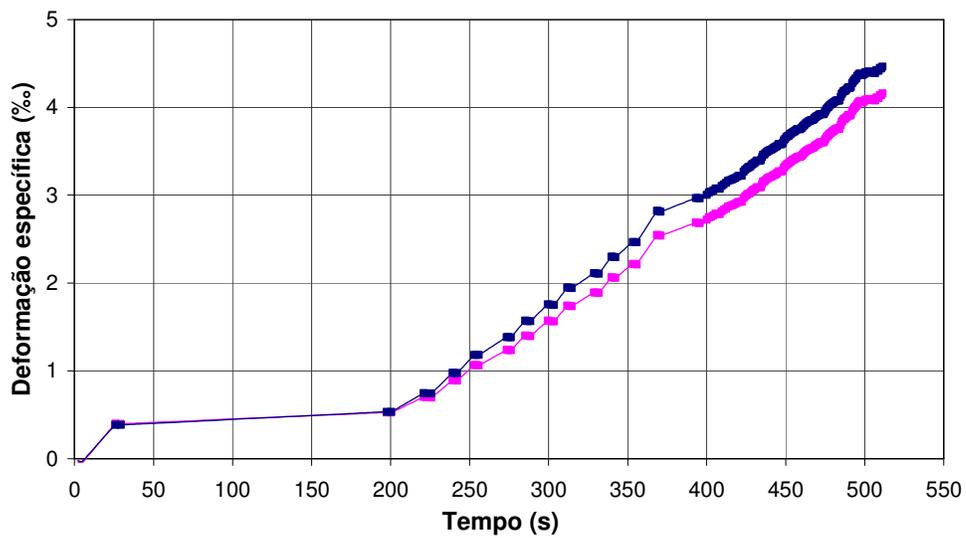


Figura 4.3 – Curva deformação específica nas tiras de fibras de carbono vs. tempo para o corpo-de-prova B45-0-01.

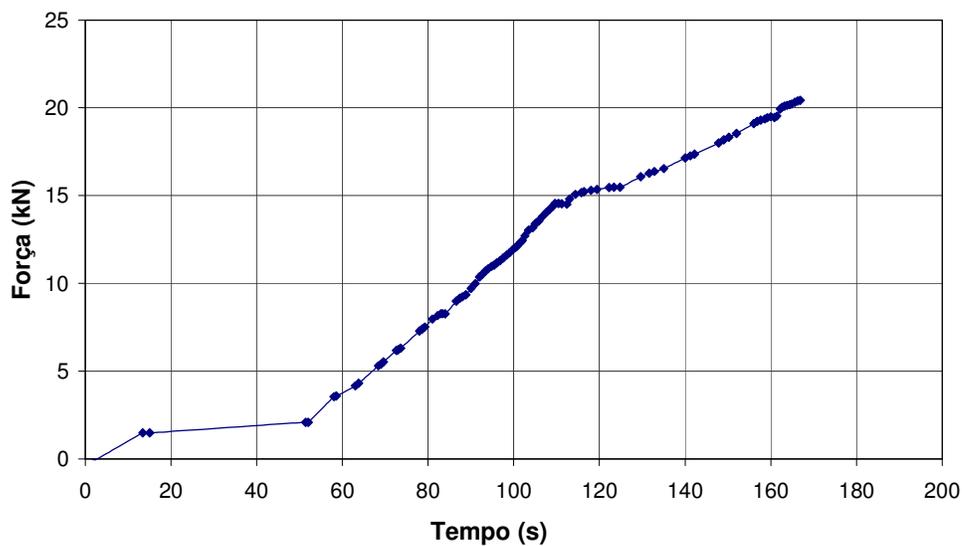


Figura 4.4 – Curva força aplicada vs. tempo para o corpo-de-prova B65-0-01.

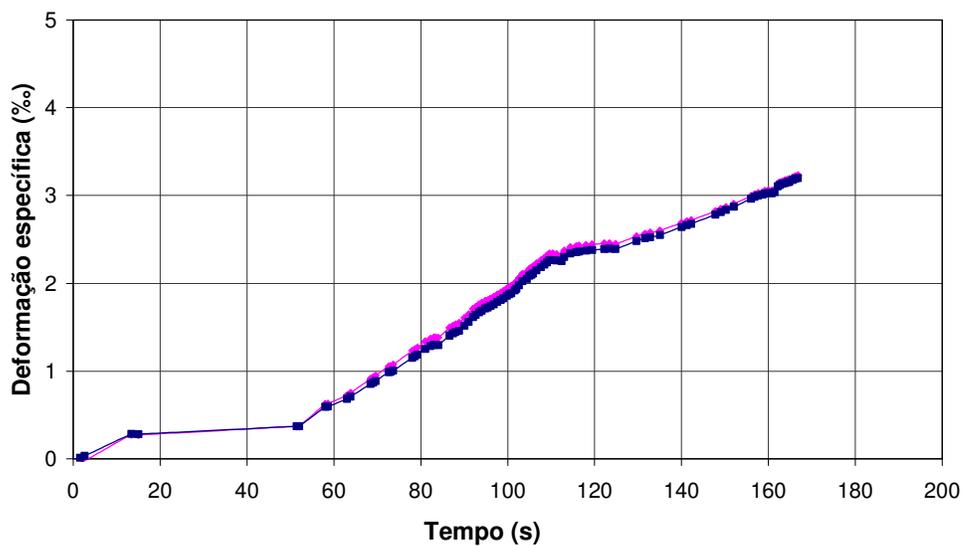


Figura 4.5 – Curva deformação específica nas tiras de fibras de carbono vs. tempo para o corpo-de-prova B65-0-01.

Para um dado valor do tempo (t) as forças nas fibras calculadas a partir dos valores do módulo de elasticidade (291,2 GPa), da seção transversal (75 mm x 0,166 mm) e das deformações medidas (Figuras 4.3 e 4.5) são compatíveis com as forças obtidas durante os ensaios (Figuras 4.2 e 4.4).

Nos ensaios dinâmicos (Figuras 4.6 a 4.11) a carga $P(t)$ é aplicada num tempo muito curto, despertando forças de inércia expressivas que não podem ser desprezadas. Portanto, faz-se necessária uma análise detalhada da Equação 4.5 a fim de identificar as forças de inércia e elástica.

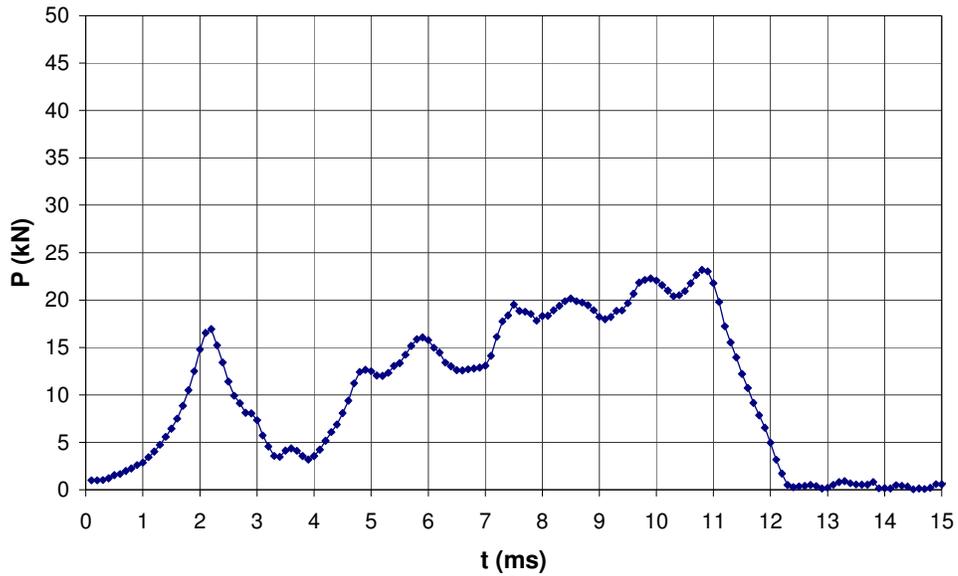


Figura 4.6 – Curva força vs. tempo para o corpo-de-prova B25-25-E.

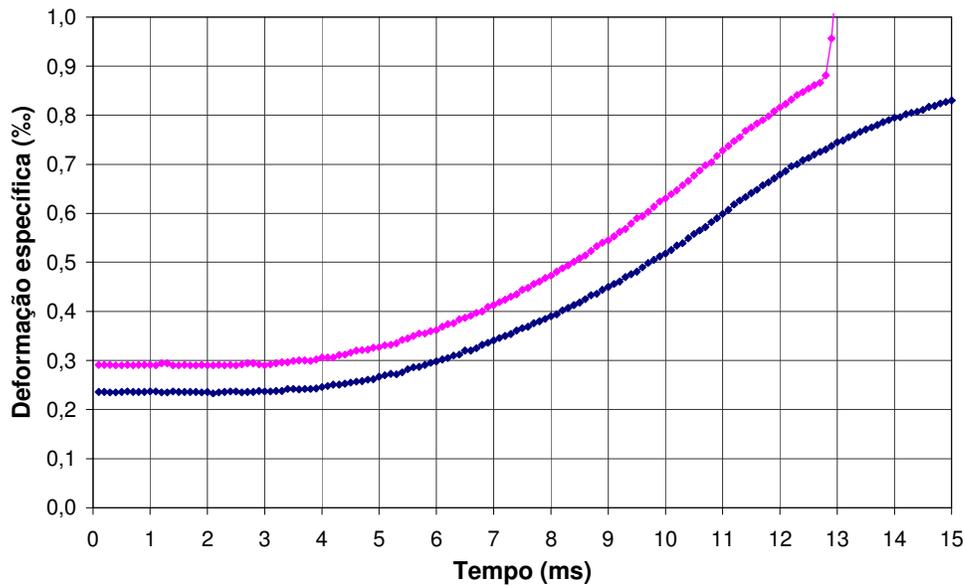


Figura 4.7 – Curva deformação específica nas tiras de fibras de carbono vs. tempo para o corpo-de-prova B25-25-E.

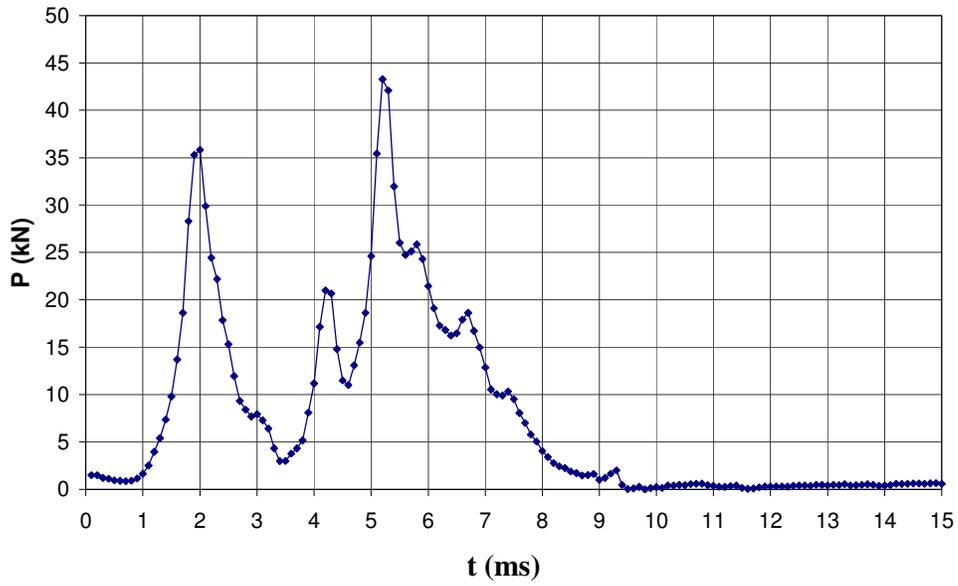


Figura 4.8 – Curva força vs. tempo para o corpo-de-prova B25-75-E.

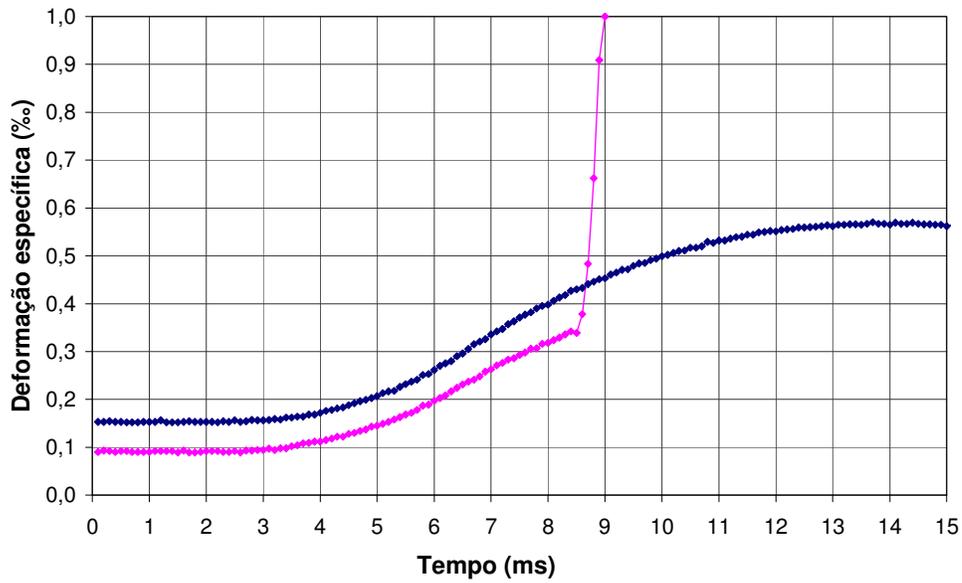


Figura 4.9 – Curva deformação específica nas tiras de fibras de carbono vs. tempo para o corpo-de-prova B25-75-E.

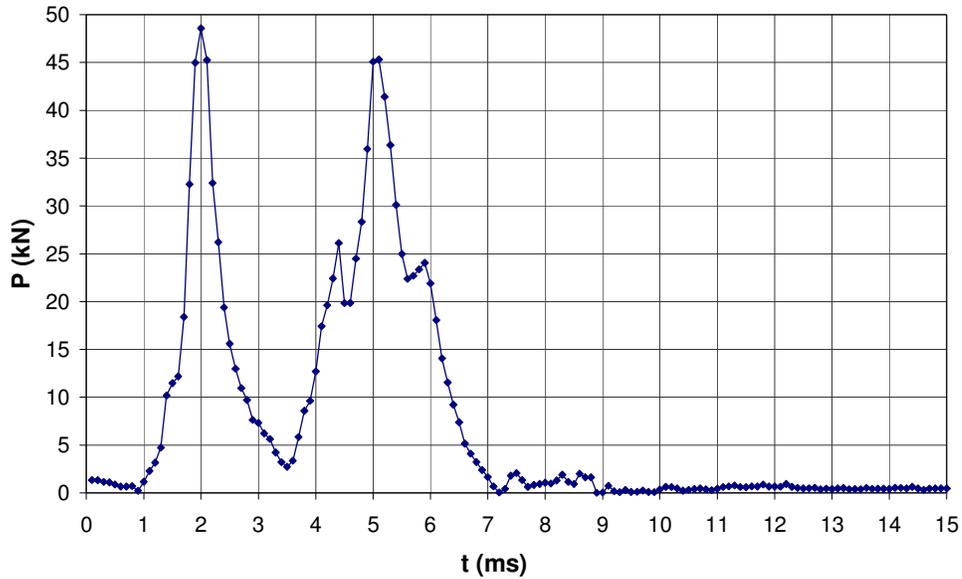


Figura 4.10 – Curva força vs. tempo do corpo-de-prova B25-125-E.

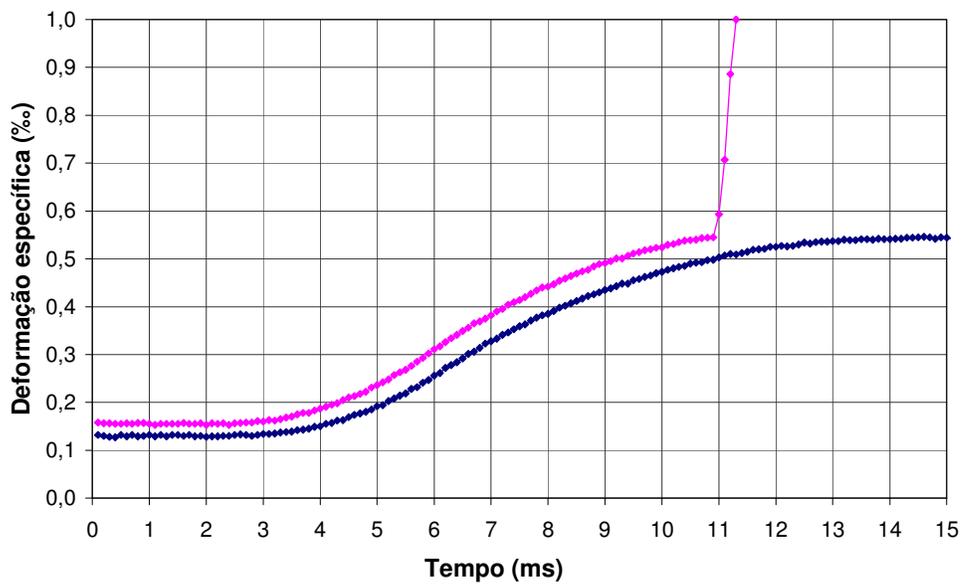


Figura 4.11 – Curva deformação específica nas tiras de fibras de carbono vs. tempo para o corpo-de-prova B25-125-E.

A força elástica (F_e) é a força que efetivamente atua na área onde as tiras de fibras de carbono foram coladas no bloco de concreto. Esses valores são imprescindíveis para o cálculo da resistência de aderência.

Para um sistema linear sem amortecimento a resposta do sistema submetido a cargas impulsivas pode ser obtida pela Equação Integral de Duhamel:

$$u(t) = \frac{1}{m\omega} \int_0^t P(\tau) \operatorname{sen} \omega (t - \tau) d\tau \quad (4.6)$$

Nesse método a carga dinâmica $P(\tau)$ é considerada como uma sucessão de impulsos infinitesimais. A resposta final é obtida pela soma de todas as respostas diferenciais (método da superposição).

Nos casos mostrados nas Figuras 4.6, 4.8 e 4.10, onde a carga varia arbitrariamente com o tempo, essa integral pode ser empregada. Para o cálculo da integral é necessário utilizar procedimentos numéricos. No desenvolvimento desse procedimento faz-se o uso da seguinte identidade trigonométrica:

$$\operatorname{sen} \omega(t - \tau) = \operatorname{sen} \omega t \cos \omega \tau - \cos \omega t \operatorname{sen} \omega \tau \quad (4.7)$$

Então a integral da Equação 4.6, segundo CLOUGH (1993), pode ser escrita na forma:

$$u(t) = \operatorname{sen} \omega t \frac{1}{m\omega} \int_0^t P(\tau) \cos \omega \tau d\tau - \cos \omega t \frac{1}{m\omega} \int_0^t P(\tau) \operatorname{sen} \omega \tau d\tau \quad (4.8)$$

ou

$$u(t) = \operatorname{sen} \omega t A(t) - \cos \omega t B(t) \quad (4.9)$$

onde

$$A(t) = \frac{1}{m\omega} \int_0^t P(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad (4.10)$$

$$B(t) = \frac{1}{m\omega} \int_0^t P(\tau) \operatorname{sen} \omega \tau d\tau \quad (4.11)$$

A frequência angular (ω) e o período (T) desse sistema são respectivamente:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.12)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4.13)$$

Os valores da aceleração $\ddot{u}(t)$ são calculados por meio de derivação numérica da equação dos deslocamentos $u(t)$, em seguida, obtém-se as forças de inércia (F_i) e elástica (F_e) pelas Equações 4.4 e 4.5. A título de exemplo a Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos para o corpo-de-prova B25-25-E empregando-se esse procedimento.

Tabela 4.1 – Cálculo das forças de inércia e elástica no corpo-de-prova B25-25-E.

t (ms)	P (kN)	cos Pt	sen Pt	A (t)	B (t)	u (t)	\ddot{u} (t)	Fi (kN)	Fe (kN)
0,0	0,00	1,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00
0,1	0,97	1,00	0,06	0,001	0,000	0,000	0,96	0,97	0,00
0,2	0,97	0,99	0,12	0,002	0,000	0,000	1,91	0,97	0,00
0,3	1,02	0,98	0,18	0,004	0,000	0,000	2,91	1,01	0,01
0,4	1,20	0,97	0,24	0,006	0,001	0,001	4,08	1,18	0,02
0,5	1,53	0,95	0,30	0,008	0,001	0,001	5,54	1,49	0,04
0,6	1,65	0,94	0,35	0,010	0,002	0,002	7,11	1,59	0,06
0,7	1,96	0,91	0,41	0,013	0,003	0,002	8,96	1,87	0,08
0,8	2,23	0,89	0,46	0,016	0,005	0,003	11,04	2,11	0,12
0,9	2,60	0,86	0,52	0,020	0,007	0,004	13,45	2,44	0,16
1,0	2,85	0,82	0,57	0,023	0,009	0,006	16,05	2,64	0,21
1,1	3,43	0,79	0,62	0,027	0,012	0,007	19,16	3,16	0,27
1,2	4,01	0,75	0,66	0,032	0,016	0,009	22,78	3,67	0,34
1,3	4,73	0,71	0,71	0,037	0,021	0,011	27,02	4,30	0,42
1,4	5,57	0,66	0,75	0,043	0,027	0,014	31,99	5,05	0,52
1,5	6,43	0,62	0,79	0,049	0,035	0,017	37,69	5,79	0,64
1,6	7,48	0,57	0,82	0,056	0,044	0,021	44,28	6,70	0,78
1,7	8,84	0,52	0,86	0,063	0,055	0,025	52,06	7,89	0,94
1,8	10,49	0,47	0,89	0,071	0,069	0,031	61,26	9,35	1,14
1,9	12,50	0,41	0,91	0,079	0,086	0,037	72,23	11,13	1,36
2,0	14,80	0,36	0,93	0,088	0,106	0,044	85,19	13,16	1,63

Nas Figuras 4.12 a 4.14 são apresentados os valores teóricos das forças de inércia (F_i) e elástica (F_e), juntamente com os valores experimentais do impulso P medido na célula de carga para os corpos-de-prova B25-25-E, B25-75-E e B25-125-E. As figuras mostram que, apesar da forma irregular do impulso, as forças elásticas crescem de forma regular, com o início do crescimento ocorrendo no tempo correspondente ao primeiro pico do impulso e seu valor máximo ocorrendo ao final do impulso.

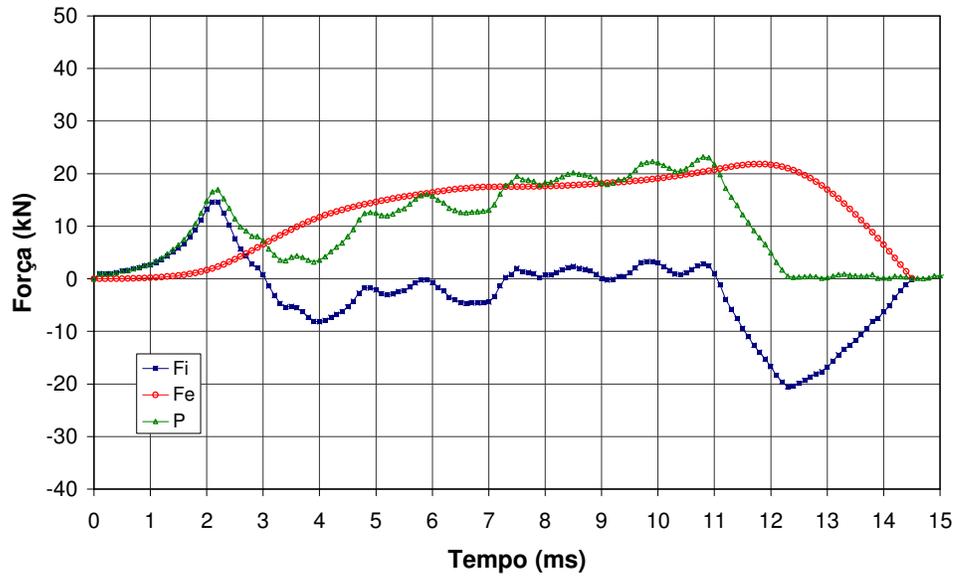


Figura 4.12 – Forças de inércia (F_i), elástica (F_e) e impulso (P) no corpo-de-prova B25-25-E.

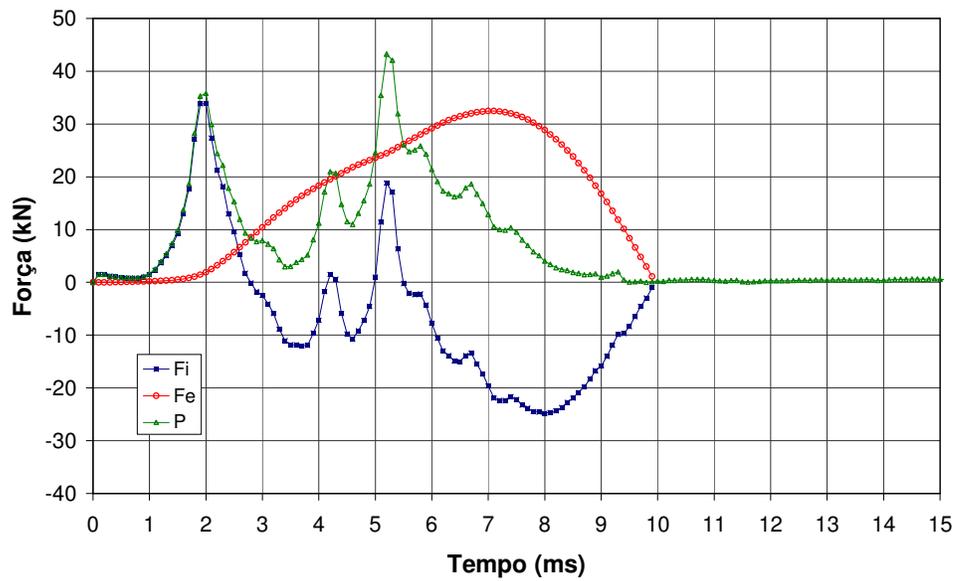


Figura 4.13 – Forças de inércia (F_i), elástica (F_e) e impulso (P) no corpo-de-prova B25-75-E.

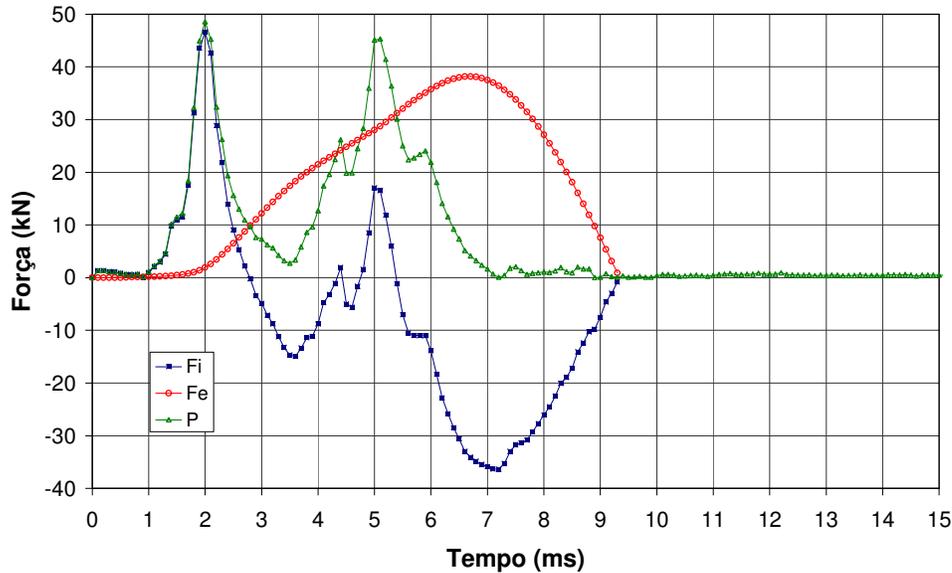


Figura 4.14 – Forças de inércia (F_i), elástica (F_e) e impulso (P) no corpo-de-prova B25-125-E.

As curvas referentes às deformações específicas medidas nas tiras de fibras de carbono mostradas nas Figuras 4.7, 4.9 e 4.11 mostram comportamento semelhante porém, com uma translação de milissegundos no eixo do tempo. Essa translação pode ser atribuída ao tempo necessário para a onda de choque percorrer o caminho entre a célula de carga e o extensômetro. Observa-se ainda que um dos extensômetros passa a fornecer valores inconsistentes a partir de um ponto próximo ao valor máximo dessas curvas. Este ponto corresponde ao instante da ruptura da aderência. O violento ricocheteio da tira de fibras de carbono causa a ruptura do fio do extensômetro que passa a fornecer valores inconsistentes.

Os valores experimentais das forças elásticas poderiam ser obtidos a partir das deformações específicas mostradas nas Figuras 4.7, 4.9 e 4.11, multiplicadas pelo módulo de elasticidade e pela área da seção transversal da tira de fibras de carbono. As curvas mostradas nessas figuras apresentam um comportamento regular, mas os valores das deformações não são compatíveis com o módulo de elasticidade do material. Para o corpo-de-prova B25-125-E, por exemplo, o valor máximo da força elástica seria:

$$F_e = \epsilon EA = 2 \times 0,00054 \times 291,2 \times 75 \times 0,166 = 3,9 \text{ kN} \quad (4.14)$$

e a resistência de aderência seria:

$$f_b = 0,5 \times 3900 / 75 \times 30 = 0,87 \text{ MPa} \quad (4.15)$$

que é um valor muito menor do que a resistência de aderência obtida nos ensaios estáticos, em torno 5 MPa. Sabe-se que o módulo de elasticidade de alguns materiais aumenta com taxa de carregamento, mas não é o caso do tecido de fibras de carbono (TANIGUCHI, 2007).

Deve-se observar que para tornar possível a colagem dos extensômetros, os trechos das tiras de fibras de carbono onde eles foram colados tiveram de ser impregnados com a resina epoxídica resultando uma espessura final do compósito fibras/resina entre 0,5 mm e 0,8 mm (a espessura do tecido de fibras é de 0,166 mm). Essa impregnação nos ensaios estáticos resulta em um aumento da rigidez axial que não afeta os resultados, porque a resina fatura logo nos estágios iniciais do ensaio devido à sua baixa resistência à tração. Nos ensaios dinâmicos, com taxa de aplicação de carregamento muito elevada, o aumento da rigidez axial do compósito fibras/resina pode ser expressivo já que as propriedades mecânicas da resina (material com visco-elasticidade pronunciada) dependem muito mais da taxa de deformação do que as propriedades da fibra. Portanto, essa pode ser a razão dos baixos valores das deformações específicas medidas nos ensaios B25-25-E, B25-75-E e B25-125-E.

Diante das dificuldades expostas, de se medir diretamente as forças elásticas nas tiras de fibras de carbono, essas foram calculadas mediante o emprego da Equação Integral de Duhamel para todos os corpos-de-prova testados. Os gráficos dos resultados dos ensaios estão no Anexo C.

4.3. Modos de Ruptura

Foram observados dois modos de ruptura em todos os ensaios: o destacamento do concreto e a ruptura por tração das fibras (Figura 4.15).

O destacamento do concreto é caracterizado pela ruptura da interface concreto-reforço, que ocorre em uma fina camada da superfície do concreto, caracterizando a ruptura da aderência. Nos ensaios em que houve ruptura por

tração das fibras observou-se que essas não estavam uniformemente tracionadas, possivelmente devido a um desalinhamento não intencional dos filamentos. Assim, as fibras mais tracionadas romperam transferindo a força para as fibras vizinhas resultando na ruptura prematura. O modo de ruptura relevante no presente estudo é o de ruptura da aderência.

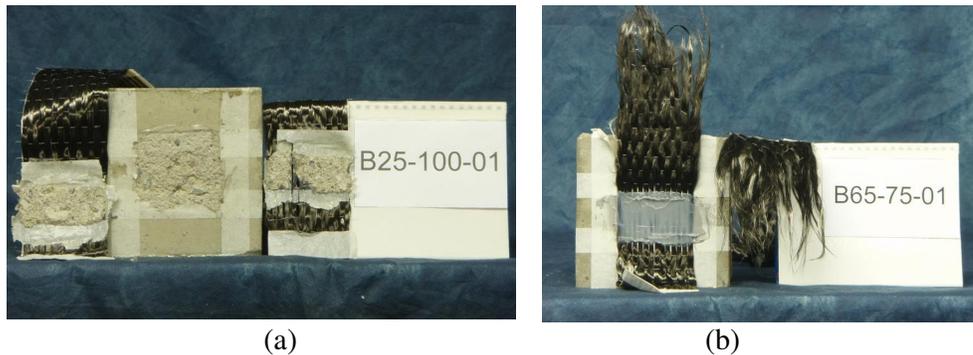


Figura 4.15 – Modos de ruptura: (a) destacamento do concreto (ruptura da aderência); (b) ruptura por tração nas fibras de carbono.

4.4. Força de Ruptura e Resistência de Aderência

Como já enfatizado anteriormente, as forças que efetivamente atuam nas áreas onde as tiras de fibras de carbono foram coladas no bloco de concreto são as forças elásticas. A força de ruptura é aquela que atua na tira e que provoca um dos dois modos de ruptura. O seu valor será considerado como sendo o valor máximo atingido pela força elástica calculada a partir dos valores experimentais do impulso. Esse cálculo, como já mencionado, foi efetuado numericamente pela integral de Duhamel.

Na Figura 4.16 estão identificados a força elástica máxima ($F_{e,max}$) e o tempo de carregamento (Δt_e) decorrido entre o instante correspondente ao início do crescimento da força e o instante em que essa atinge seu valor máximo.

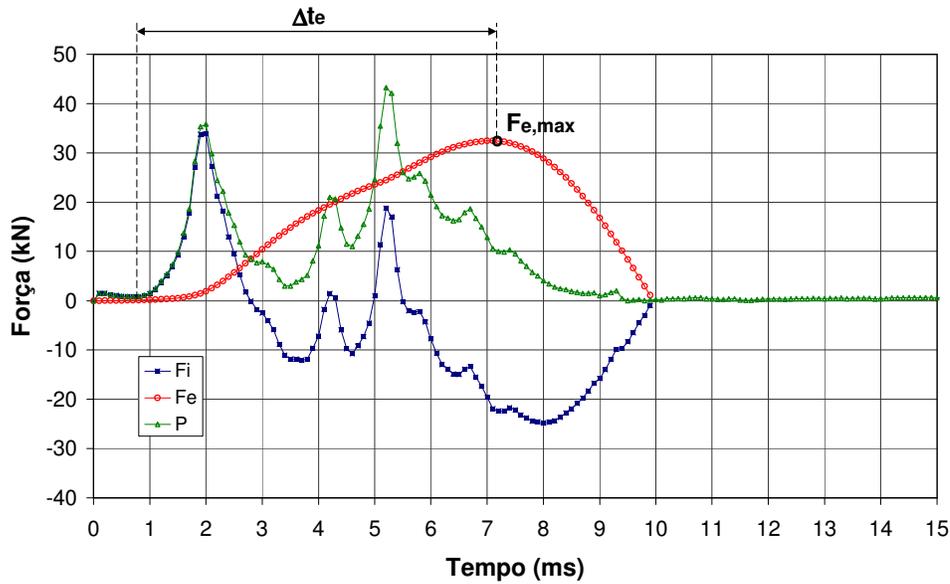


Figura 4.16 – Identificação do valor máximo da força elástica ($F_{e,Max}$) e do tempo (Δt_e) no corpo-de-prova B25-75-E.

A tensão normal na tira de fibras de carbono (σ_f), a resistência de aderência (f_b) e a taxa de carregamento (T_c) são calculadas pelas Equações 4.16, 4.17 e 4.18 respectivamente. Os valores numéricos são apresentados nas Tabelas 4.2 a 4.4.

$$\sigma_f = \frac{(F_{e,máx} / 2)}{t_f \cdot b_f} \quad (4.16)$$

$$f_b = \frac{(F_{e,máx} / 2)}{L_a \cdot b_f} \quad (4.17)$$

$$T_c = \frac{\sigma_f}{\Delta t_e} \quad (4.16)$$

onde $F_{e,máx}$ é o valor máximo da força elástica total nas duas tiras, t_f é a espessura da seção transversal da tira, b_f é a largura da tira e L_a é o comprimento de ancoragem.

Tabela 4.2 – Resultados experimentais dos corpos-de-prova da série $f_{c,n} = 25$ MPa.

Corpo-de-prova	f_c (MPa)	F_e (kN)	Δt_e (s)	σ_f (MPa)	f_b (MPa)	T_c (GPa/s)	Modo de Ruptura
B25-0-01	25,2	16,89	217,43	678	3,75	0	D C
B25-0-02	25,2	18,57	200,83	746	4,13	0	D C
B25-25-01	26,8	32,51	0,0167	1306	7,22	78	D C
B25-25-02	26,8	35,83	0,0079	1439	7,96	182	D C
B25-25-E	25,2	21,81	0,0115	876	4,85	76	D C
B25-50-01	24,7	30,97	0,0115	1244	6,88	108	D C
B25-50-02	23,6	29,2	0,0104	1173	6,49	113	D C
B25-75-01	24,8	34,29	0,0113	1377	7,62	122	R F
B25-75-02	26,8	40,76	0,0088	1637	9,06	186	D C
B25-75-E	25,2	32,47	0,0068	1304	7,22	192	D C
B25-100-01	22,0	33,63	0,006	1351	7,47	225	D C
B25-100-02	25,2	30,86	0,0059	1239	6,86	210	D C
B25-125-01	21,9	29,99	0,0055	1204	6,66	219	D C
B25-125-02	25,8	36,99	0,0057	1486	8,22	261	D C
B25-125-E	25,2	38,17	0,0064	1533	8,48	240	D C
B25-150-01	26,8	32,54	0,0063	1307	7,23	207	D C
B25-150-02	27,2	46,97	0,0043	1886	10,44	439	D C

Tabela 4.3 – Resultados experimentais dos corpos-de-prova da série $f_{c,n} = 45$ MPa.

Corpo-de-prova	f_c (MPa)	F_e (kN)	Δt_e (s)	σ_f (MPa)	f_b (MPa)	T_c (GPa/s)	Modo de Ruptura
B45-0-01	42,7	24,49	511,22	984	3,75	0	D C
B45-0-02	42,7	23,52	325,82	945	4,13	0	D C
B45-25-01	41,2	33,17	0,0087	1332	7,37	153	D C
B45-25-02	43,3	38,02	0,0171	1527	8,45	89	D C
B45-50-01	40,5	34,68	0,0160	1393	7,71	87	D C
B45-50-02	42,4	40,94	0,0145	1644	9,10	113	R F
B45-75-01	44,7	33,02	0,0091	1326	7,34	146	D C
B45-75-02	44,4	33,44	0,0097	1343	7,43	138	D C
B45-100-01	42,9	31,18	0,0068	1252	6,93	184	D C
B45-100-02	43,1	38,18	0,0074	1533	8,48	207	D C
B45-125-01	44,3	36,83	0,0063	1479	8,18	235	D C
B45-125-02	41,9	36,50	0,0055	1466	8,11	267	D C
B45-150-01	41,4	39,12	0,0087	1571	8,69	181	D C
B45-150-02	42,4	37,46	0,0069	1504	8,32	218	R F

Tabela 4.4 – Resultados experimentais dos corpos-de-prova da série $f_{c,n} = 65$ MPa.

Corpo-de-prova	f_c (MPa)	F_e (kN)	Δt_e (s)	σ_f (MPa)	f_b (MPa)	T_c (GPa/s)	Modo de Ruptura
B65-0-01	63,7	20,42	166,83	820	4,54	0	D C
B65-0-02	63,7	21,79	168,82	875	4,84	0	D C
B65-25-01	69,4	35,92	0,0184	1443	7,98	78	D C
B65-25-02	61,2	37,28	0,018	1497	8,28	83	D C
B65-50-01	58,5	31,85	0,0164	1279	7,08	78	D C
B65-50-02	66,0	39,28	0,0072	1578	8,73	219	D C
B65-75-01	70,3	32,20	0,0059	1293	7,16	219	R F
B65-75-02	60,3	37,94	0,0115	1524	8,43	132	D C
B65-100-01	60,3	34,69	0,0101	1393	7,71	138	R F
B65-100-02	65,1	39,77	0,0081	1597	8,84	197	D C
B65-125-01	65,3	32,60	0,0059	1309	7,24	222	D C
B65-125-02	64,2	42,17	0,0049	1694	9,37	346	R F
B65-150-01	62,6	46,94	0,0068	1885	10,43	277	R F
B65-150-02	61,3	37,38	0,0054	1501	8,31	278	D C

4.5.

Influência da Taxa de Carregamento sobre a Resistência de Aderência

Neste item são analisados os efeitos da taxa de carregamento sobre a resistência de aderência entre o CFC e o substrato de concreto.

Os corpos-de-prova, B25-75-01, B45-50-02, B45-150-02, B65-75-01, B65-100-01, B65-125-02 e B65-150-01 não foram considerados na análise dos resultados, pois esses romperam por tração nas fibras.

As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam os resultados obtidos por meio das Equações 4.16 e 4.17 referentes à resistência de aderência (f_b) e à taxa de carregamento (T_c) dos corpos-de-prova para as resistências à compressão de 25 MPa, 45 MPa e 65 MPa, respectivamente.

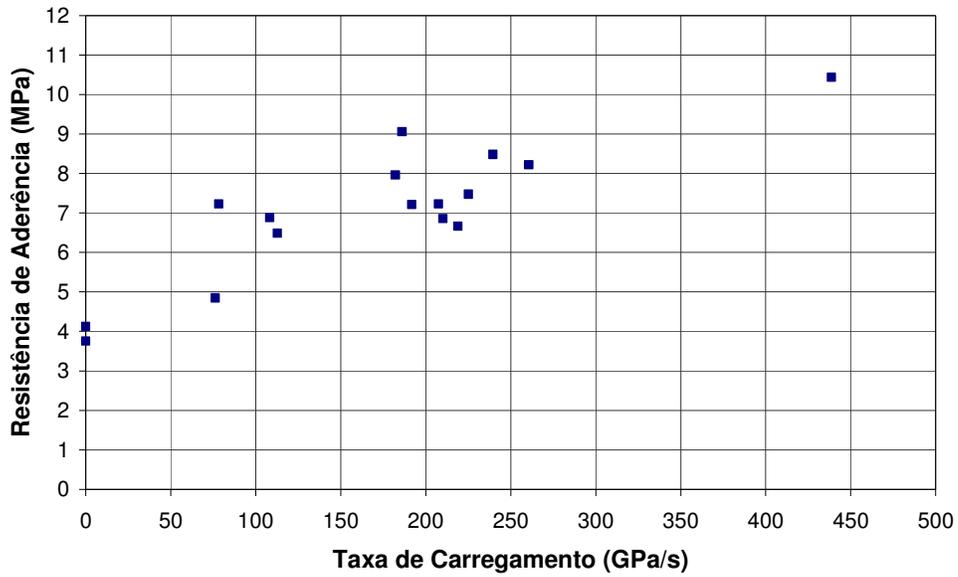


Figura 4.17– Resistência de aderência (f_b) vs. taxa de carregamento (T_c) para corpos-de-prova com resistência a compressão de 25 MPa.

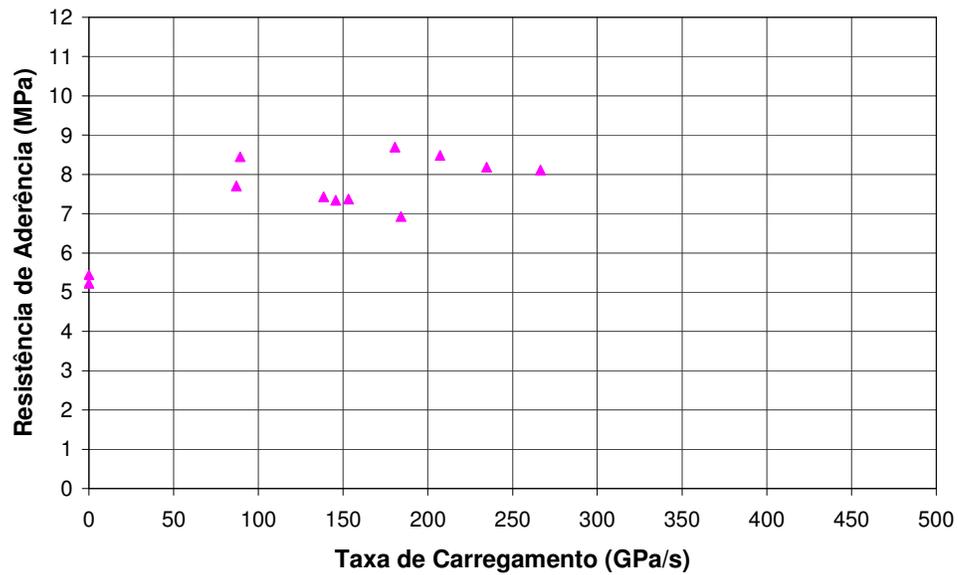


Figura 4.18 – Resistência de aderência (f_b) vs. taxa de carregamento (T_c) para corpos-de-prova com resistência a compressão de 45 MPa.

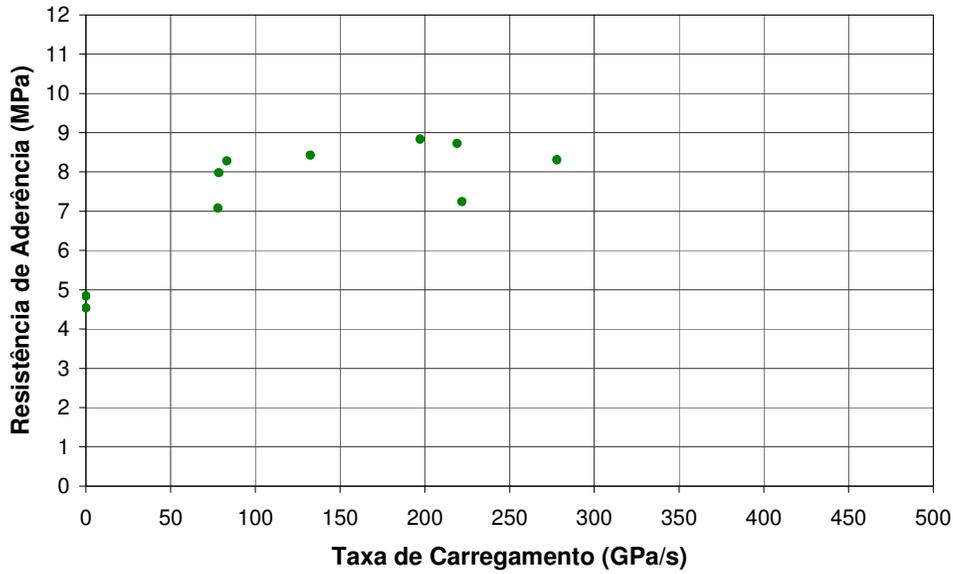
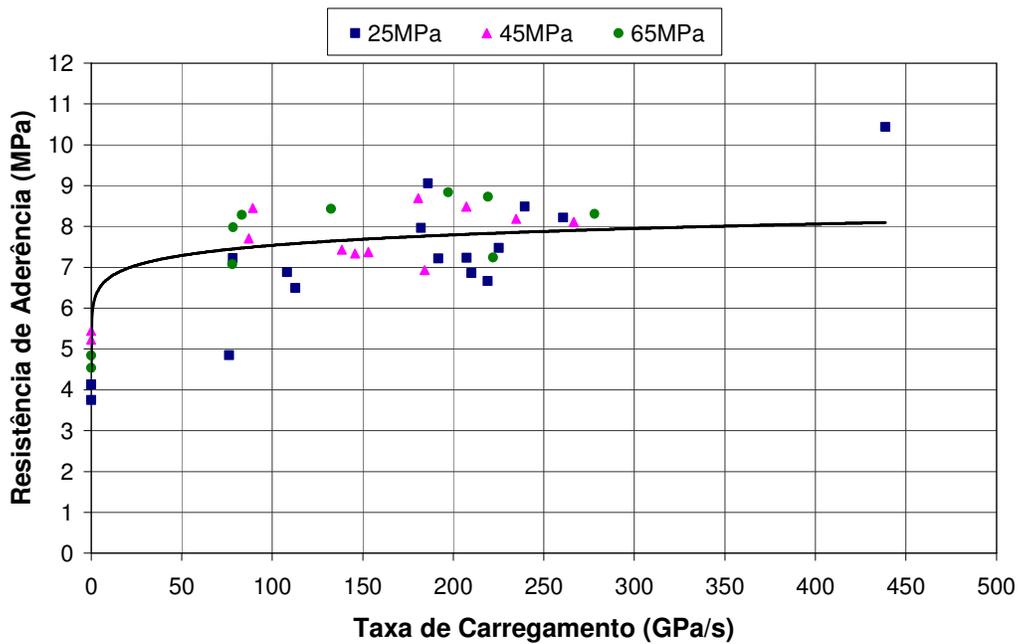


Figura 4.19 – Resistência de aderência (f_b) vs. taxa de carregamento (T_c) para corpos-de-prova com resistência a compressão de 65 MPa.

A Figura 4.20 apresenta todos os valores obtidos nos resultados dos ensaios estáticos e dinâmicos, cujos corpos-de-prova romperam por destacamento do concreto, ou seja, nos quais a resistência de aderência foi efetivamente atingida.



Mesmo com a dispersão dos resultados, observa-se que os valores de resistência de aderência aumentam com o aumento da taxa de carregamento, podendo chegar a duas vezes os valores de resistência de aderência obtidos nos ensaios estáticos. Essa relação pode ser considerada como uma função potência representada pela Equação 4.17 obtida pelo método dos mínimos quadrados, com coeficiente de correlação $R^2 = 0,70$.

$$f_b = 6,03 T_c^{0,05} \quad (4.17)$$

com f_b em MPa e T_c em MPa/s.

Na análise dos resultados dos ensaios dinâmicos observa-se que a resistência de aderência não depende da resistência do concreto. Tal característica é compatível com os resultados dos ensaios estáticos apresentados por MENEGHEL (2005) e PACHECO (2006).