

## **4 Apresentação e Análise dos Resultados**

### **4.1. Considerações Iniciais**

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios. São apresentadas curvas tensão *vs* deformação específica, força *vs* tempo e deformação específica *vs* tempo dos pinos P16, e curvas força *vs* tempo dos blocos. As curvas força *vs* deformação específica e deformação específica *vs* tempo nos pinos dos blocos são apresentadas no Anexo C.

São analisados as áreas projetadas das superfícies dos cones de ruptura e seus ângulos de inclinação. Analisa-se a influência da taxa de carregamento na resistência do concreto, dos pinos P16 e dos blocos em estudo. Faz-se uma comparação entre os dados experimentais e os métodos de cálculo.

### **4.2. Propriedades do Concreto**

#### **4.2.1. Resistência à Compressão Simples**

A Tabela 4.1 apresenta os valores da resistência à compressão simples do concreto dos blocos por betonada. Cada valor corresponde à média dos resultados dos ensaios de três corpos-de-prova cilíndricos 100 mm x 200 mm. A Figura 4.1 mostra a variação da resistência à compressão simples do concreto por betonada.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de compressão simples do concreto.

Betonada	$f_{cm28}$ (MPa)	Bloco	Idade (dias)	$f_{cm}$ (MPa)
1ª	19,3	B22-9B	42	22,1
		B22-11R	39	19,8
2ª	19,3	B22-7B	97	23,1
		B22-8B	93	22,6
3ª	23,0	B22-5A	101	23,0
		B22-6B		
4ª	21,9	B22-3A	115	23,7
		B22-4A		
5ª	19,2	B22-1A	115	21,2
		B22-2A		
6ª	22,0	B22-12R	-	-
		B22-13R	116	23

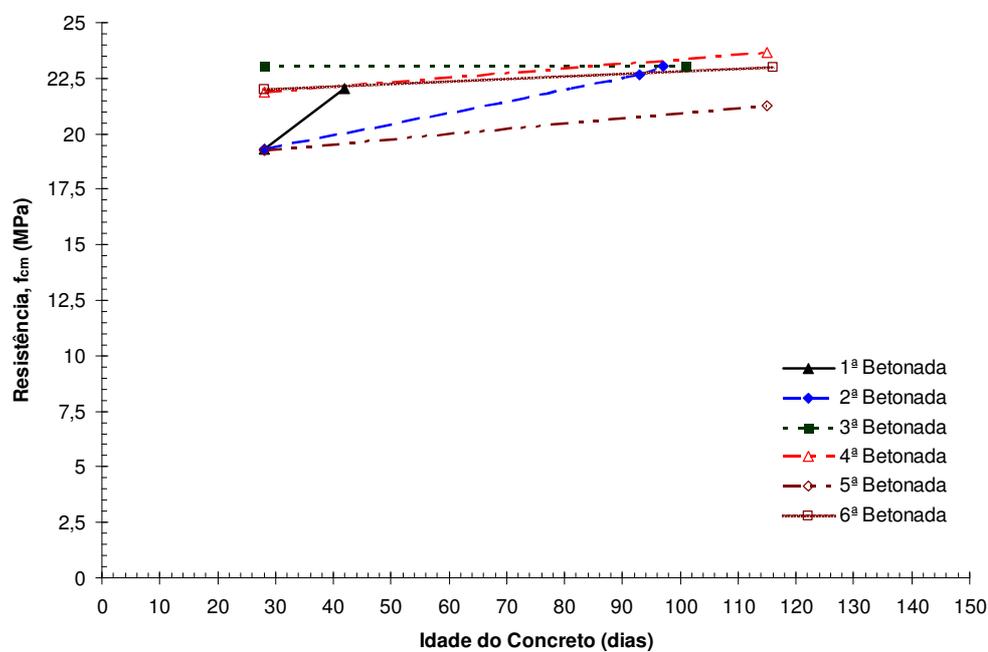


Figura 4.1 – Variação da resistência média à compressão simples do concreto por betonada.

#### 4.2.2. Resistência à Tração

Os valores das tensões máximas, estáticas e dinâmicas, e taxas de carregamento alcançadas nos ensaios de compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos encontram-se na Tabela 4.2. Os valores de tensão são calculados pela expressão (3.3). A taxa de carregamento apresentada representa a inclinação de uma reta ligando o ponto correspondente ao início do carregamento ao ponto correspondente à força máxima observada no ensaio.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de tração do concreto por compressão diametral.

Betonada	$f_{t,est}$ (MPa)	$f_{t,est,m}$ (MPa)	$f_{t,din}$ (MPa)	TC (kN/s)	$f_{t,din}/f_{t,est,m}$
1ª	2,26	2,54	-	-	-
	2,50		-	-	-
	2,87		-	-	-
2ª	2,14	2,48	3,23	17417	1,30
	2,51		3,69	14021	1,49
	2,80		3,96	16244	1,60
3ª	2,20	2,48	2,44	7	0,98
	2,54		2,49	5,9	1,00
	2,69		2,77	5,8	1,12
4ª	2,27	2,35	2,79	4968	1,19
	2,34		3,24	5808	1,38
	2,46		3,28	5834	1,39
5ª	2,02	2,34	3,05	23173	1,30
	2,26		3,21	23469	1,37
	2,75		3,38	21166	1,44
6ª	2,03	2,35	3,17	21611	1,35
	2,22		3,45	26114	1,47
	2,80		3,73	35479	1,59
$f_{t,est}$ - resistência à tração obtida em ensaio estático. $f_{t,m}$ - valor médio de $f_{t,est}$ . $f_{t,din}$ - resistência à tração dinâmica. TC - taxa de carregamento.					

Da Figura 4.2 a Figura 4.6 são apresentadas as curvas força vs tempo dos ensaios dinâmicos de compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.

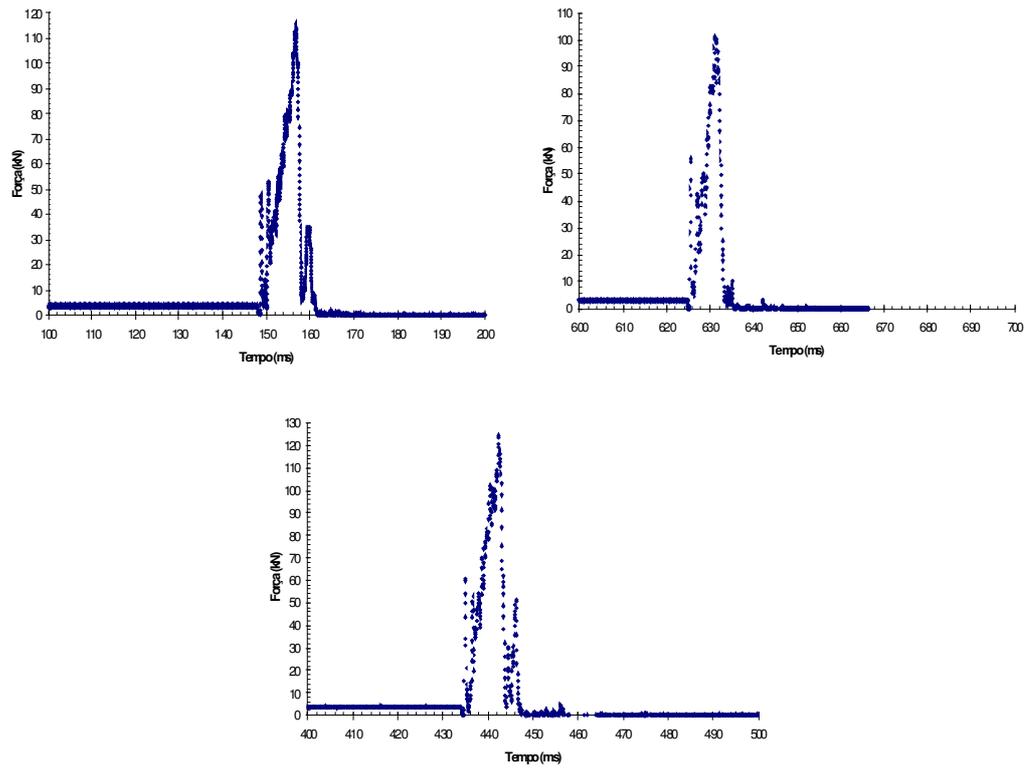


Figura 4.2 – Curvas força vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos de compressão diametral - betonada 2.

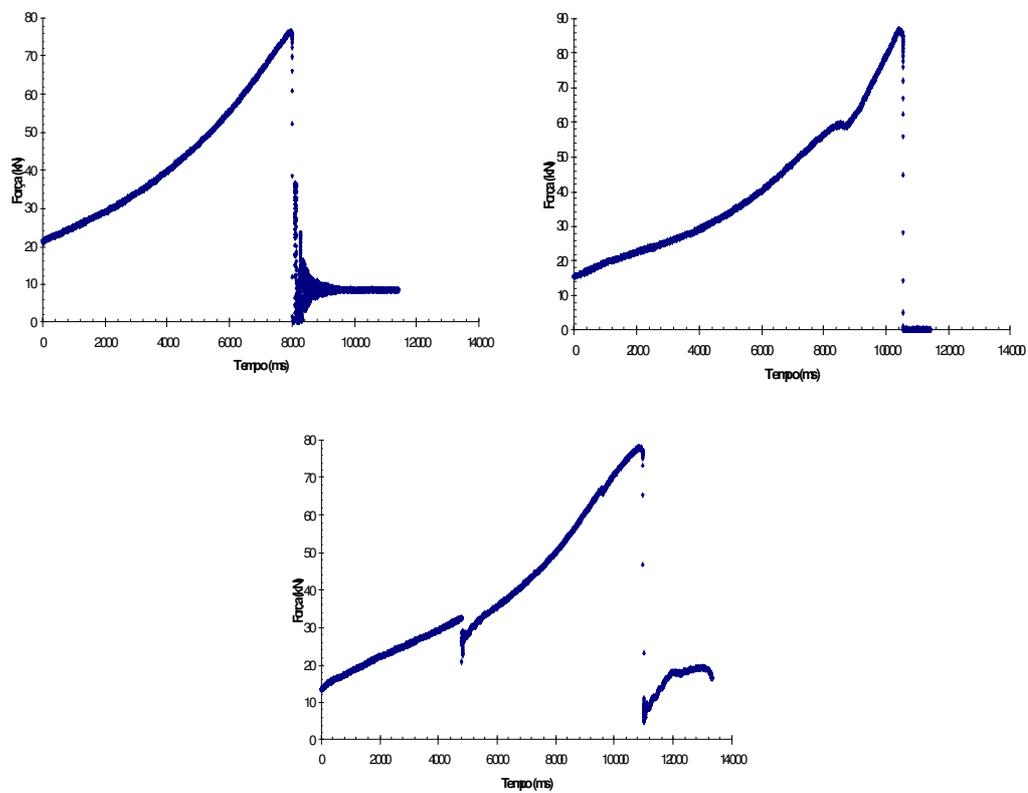


Figura 4.3 – Curvas força vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos de compressão diametral - betonada 3.

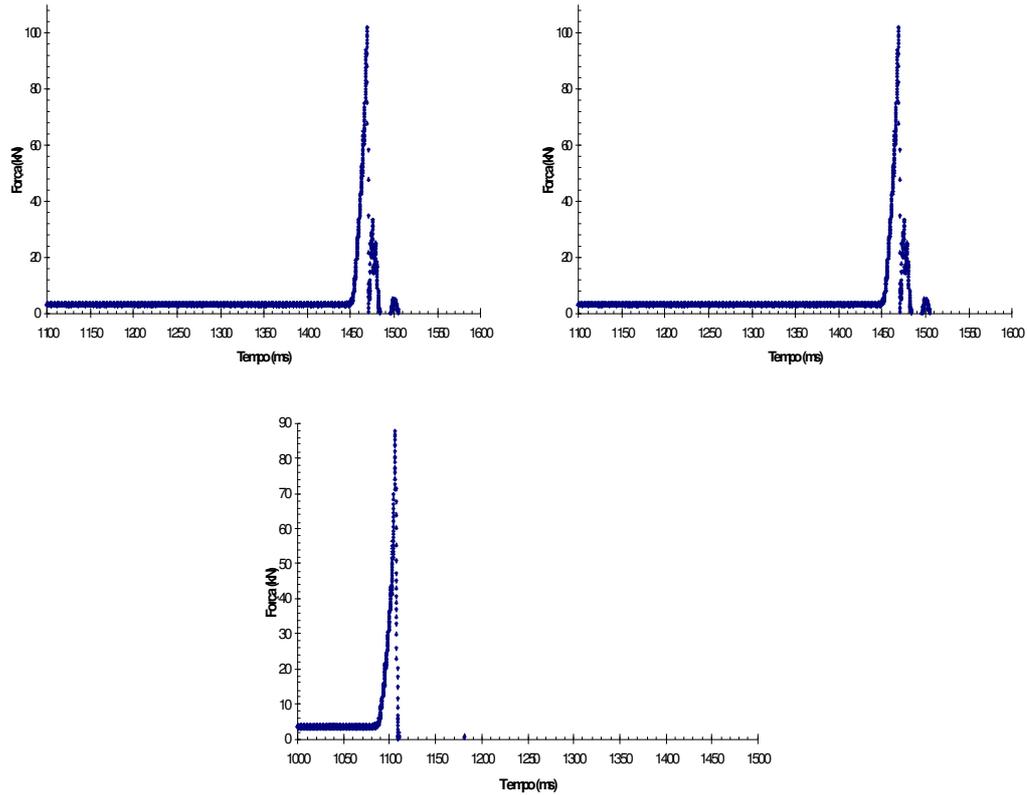


Figura 4.4 – Curvas força vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos de compressão diametral - betonada 4.

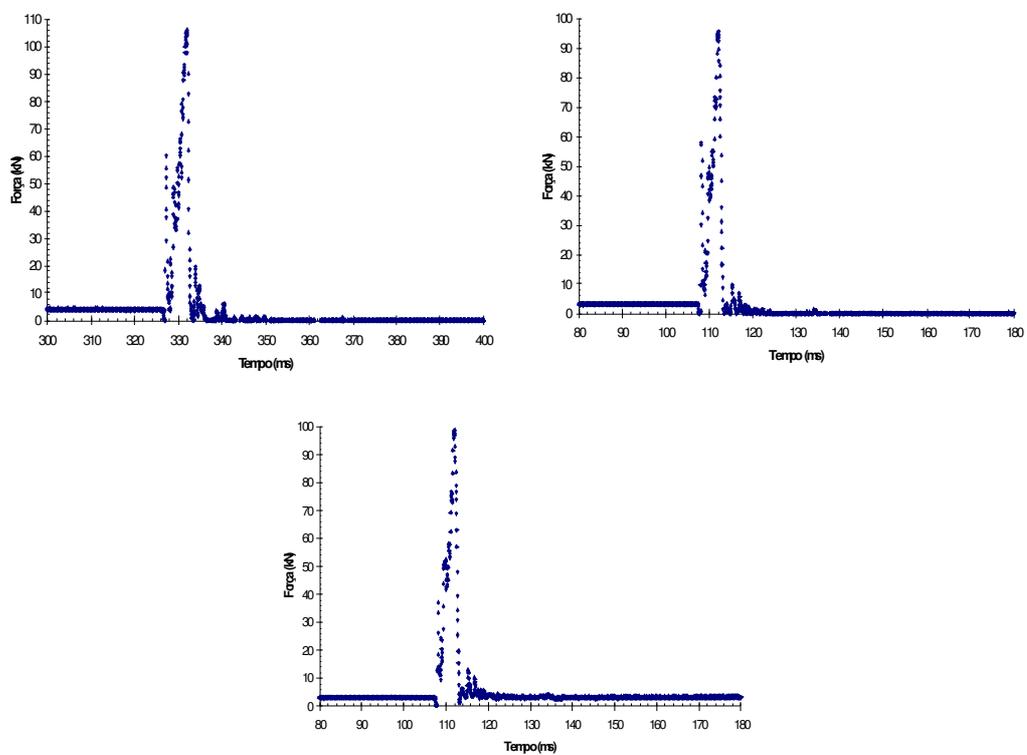


Figura 4.5 – Curvas força vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos de compressão diametral - betonada 5.

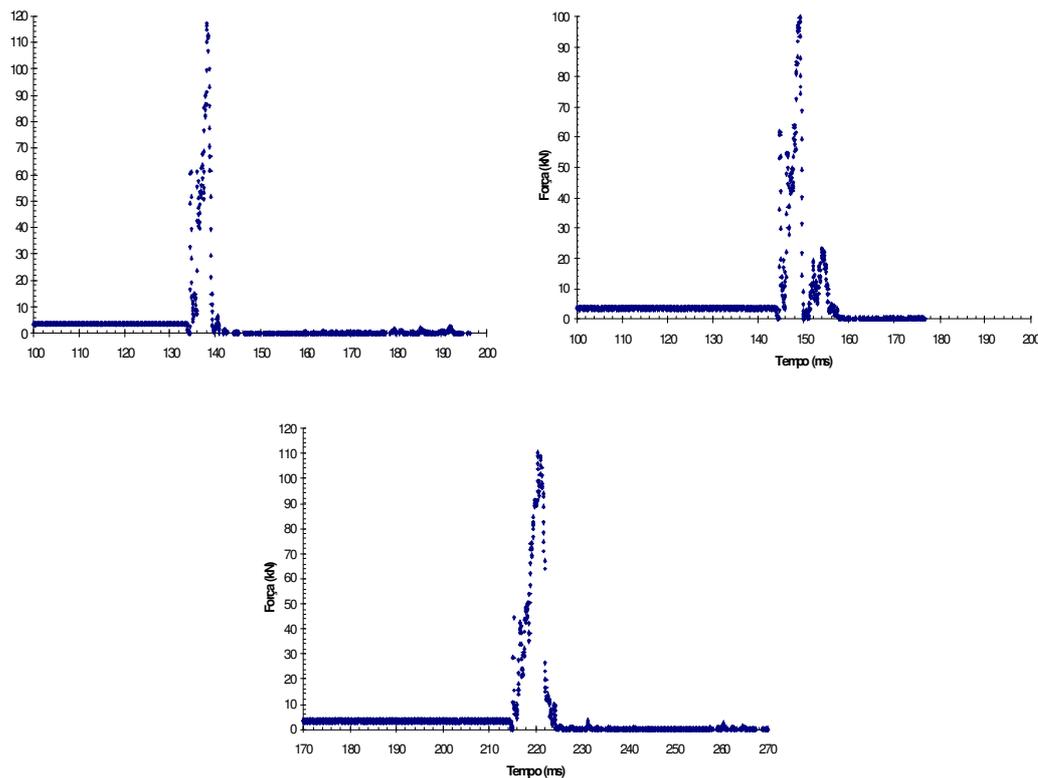
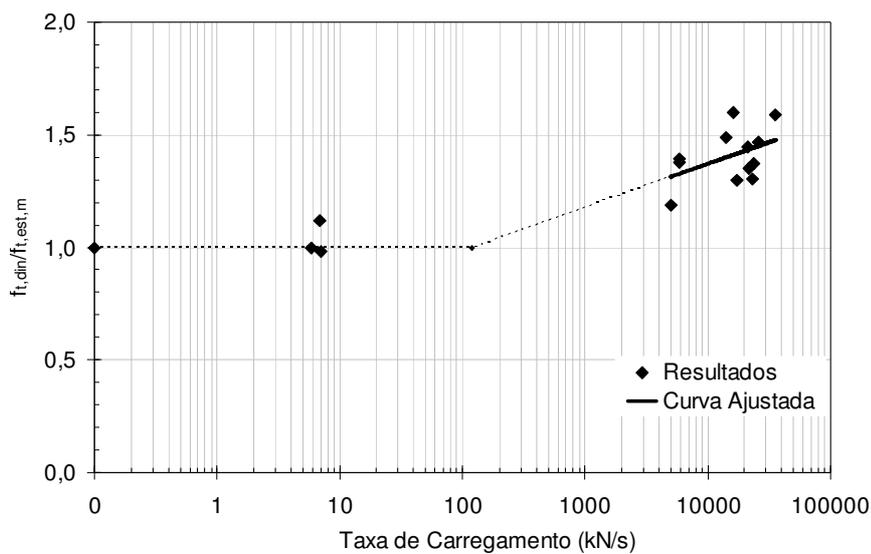


Figura 4.6 – Curvas força vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos de compressão diametral - betonada 6.

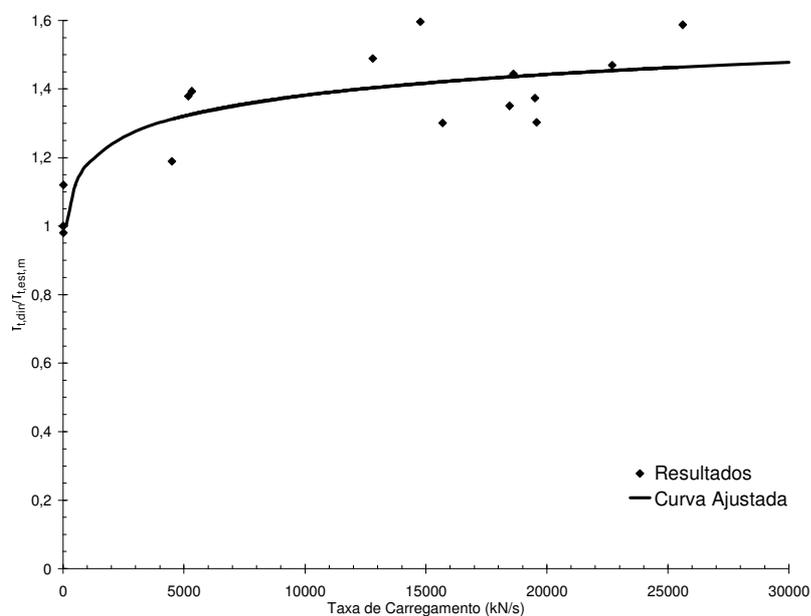
As curvas da Figura 4.2, Figura 4.5 e Figura 4.6 apresentaram um pequeno decréscimo no valor da carga, imediatamente após o impacto. Este decréscimo é abordado no item 4.3. Na betonada 3 a taxa de carregamento é muito baixa, correspondendo a um carregamento quase-estático, explicando a relação  $f_{t,din} / f_{t,est,m} = 1$ . Para as cargas dinâmicas a relação  $f_{t,din} / f_{t,est,m}$  cresce a medida que cresce a taxa de carregamento variando entre 1,19 e 1,60.

#### 4.2.2.1. Influência da Taxa de Carregamento

A Figura 4.7 mostra a influência da taxa de carregamento sobre a resistência à tração do concreto. Nesta figura,  $f_{t,din}$  representa as resistência à tração dinâmica, e  $f_{t,est,m}$  representa a resistência média à tração estática do concreto.



(a)



(b)

Figura 4.7 – Crescimento relativo da resistência à tração do concreto vs taxa de carregamento: a) escala logarítmica; b) escala linear.

Na Figura 4.7a observa-se que até a taxa de aproximadamente 120 kN/s a resistência à tração do pino não apresenta crescimento significativo. A partir dessa taxa o crescimento pode ser descrito pela expressão (4.1), obtida pelo método dos mínimos quadrados, válida para  $TC > 120$  kN/s. O coeficiente de correlação foi  $R^2 = 0,2064$ .

$$f_{t,din} / f_{t,est,m} = 0,0834 \ln(TC) + 0,603 \quad (4.1)$$

onde TC é a taxa de carregamento em kN/s.

### 4.3.

#### Ensaio dos Pinos P16

##### 4.3.1.

##### Resultados Gerais

A Tabela 4.3 mostra um resumo dos resultados experimentais dos pinos. Os valores da taxa de carregamento TC dados na Tabela 4.3 representam a inclinação de uma reta ligando os pontos extremos da parte linear das curvas de carregamento.

Tabela 4.3 – Resultados gerais obtidos nos ensaios dos pinos.

PINO	Área (cm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (‰)	$\Delta t$ (ms)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\Delta F$ (kN)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	TC	
								(kN/s)	(MPa/s)
P16EST	1,89	470	2,4	-	97,82	97,82	518,40	-	-
P16EST-I	1,89	450	2,4	6.250	99,1	87,19	525,20	20	107
P16W180H100-MOLA	1,89	440	3,0	23,8	103,5	96,61	548,74	14.169	75.094
P16W180H100 - P	1,89	450	3,0	12,1	116,1	110,25	615,50	17.490	92.692
P16W180H100 - B	1,83	470	2,4	11,2	108,1	101,83	592,03	24.376	133.448
P16W100H220 - P	1,83	470	3,0	11,3	118,4	112,86	648,20	25.627	140.297
P16W100H220 - B	1,89	450	3,0	11,8	107,2	101,05	568,00	20.236	107.222
P16W180H220 - P	1,91	500,00	3,0	5,3	114,5	108,83	599,20	29.271	153.143
P16W180H220 - B	1,80	600	3,0	4,3	115,2	109,09	638,80	42.470	235.500

$\sigma_y$  - tensão de início de escoamento.  
 $\epsilon_y$  - deformação específica correspondente a  $\sigma_y$ .  
 $\Delta t$  - tempo de carregamento.  
 $F_{m\acute{a}x}$  - força máxima  
 $\sigma_{m\acute{a}x}$  - tensão máxima  
TC - taxa de carregamento.

A Figura 4.8 mostra a curva tensão vs deformação específica obtida no ensaio estático do pino P16EST.

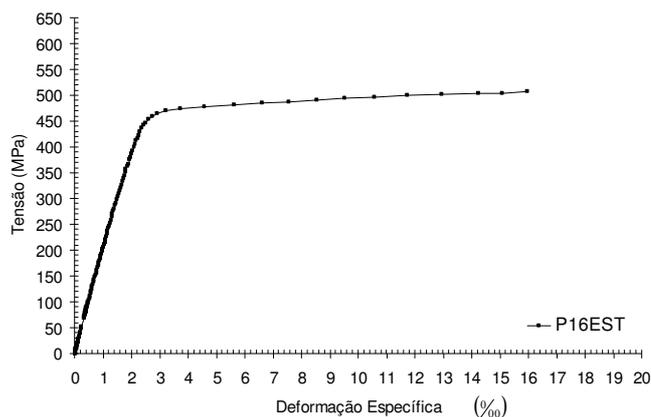


Figura 4.8 – Curvas tensão vs deformação específica obtida no ensaio do pino P16EST.

A Figura 4.9 mostra as curvas tensão vs deformação específica obtidas nos ensaios dinâmicos dos pinos P16.

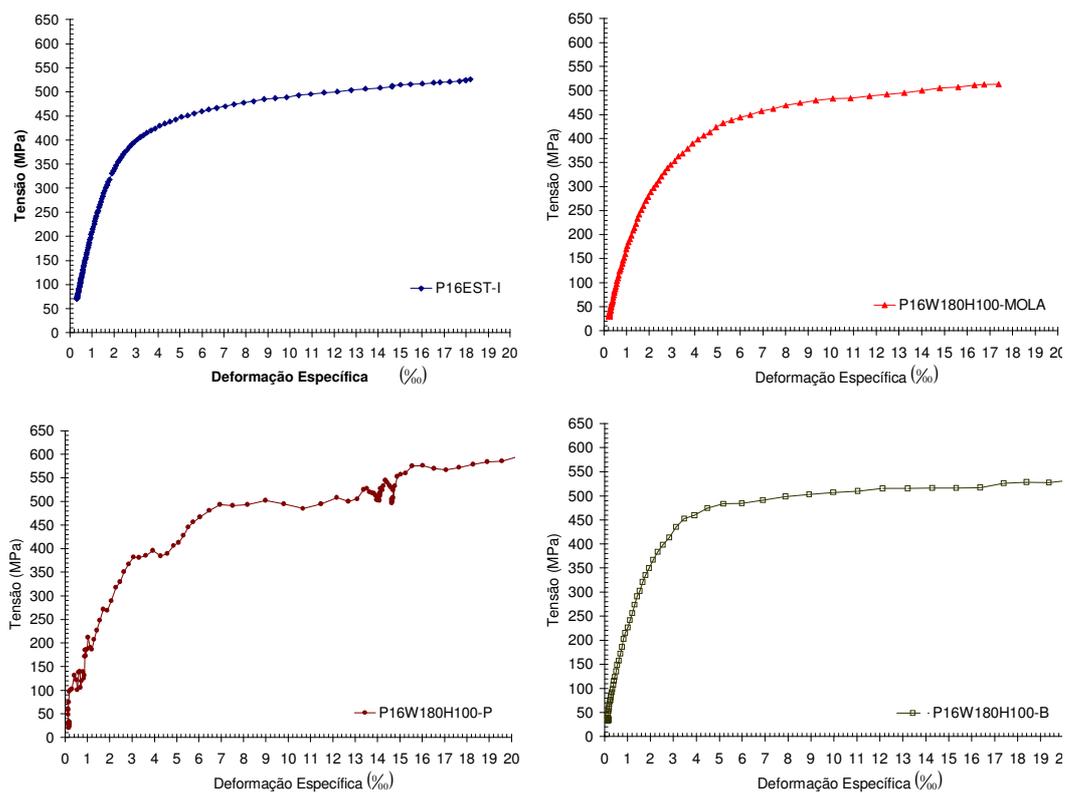


Figura 4.9 – Curvas tensão vs deformação específica obtidas nos ensaios dinâmicos dos pinos P16.

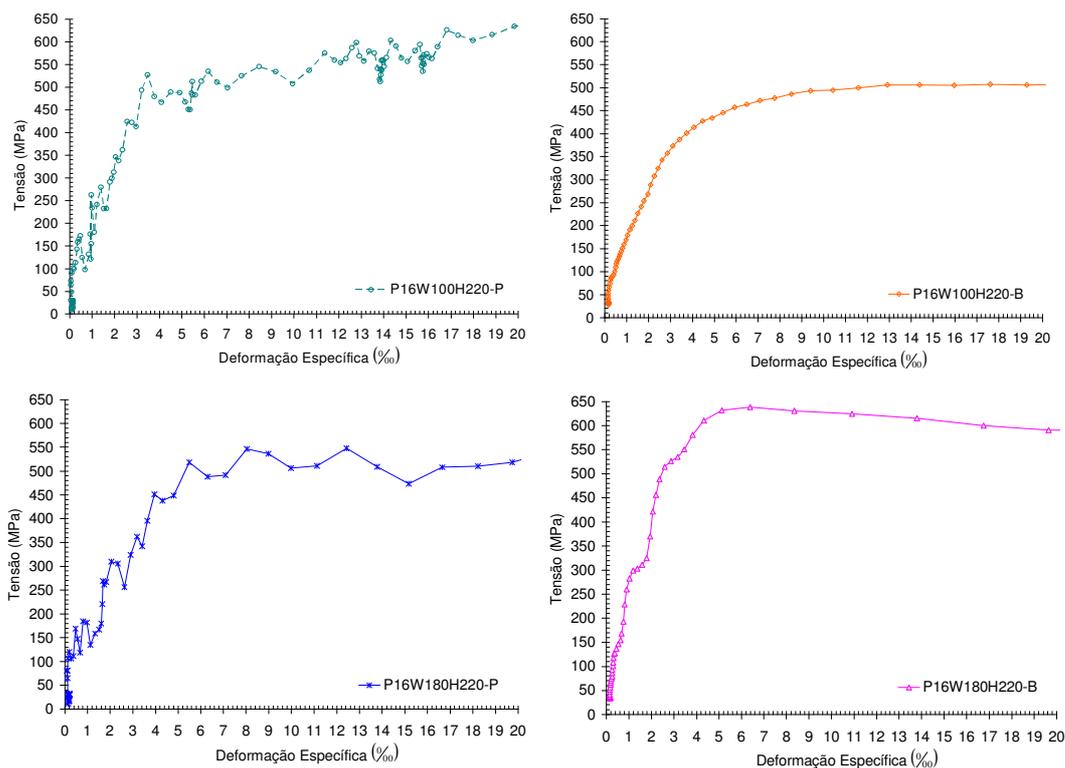


Figura 4.9 – Curvas tensão vs deformação específica obtidas nos ensaios dinâmicos dos pinos P16 (continuação).

A Figura 4.10 mostra as curvas tensão vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos dos pinos P16.

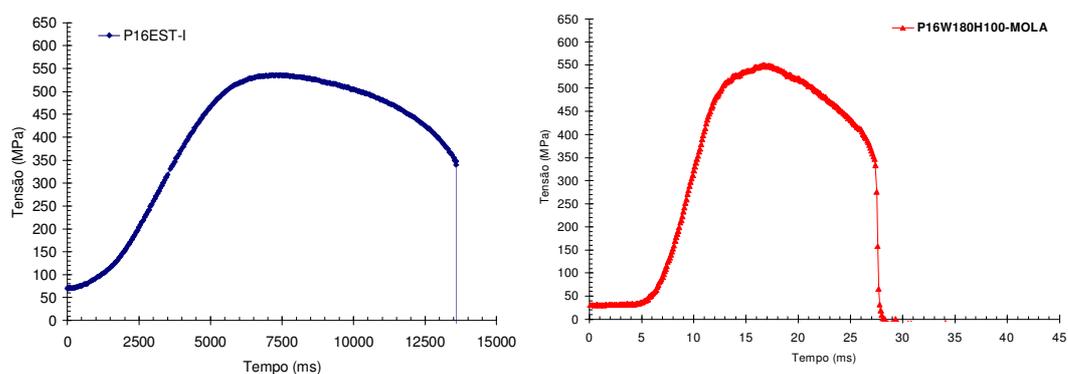


Figura 4.10 – Curvas tensão vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos dos pinos P16.

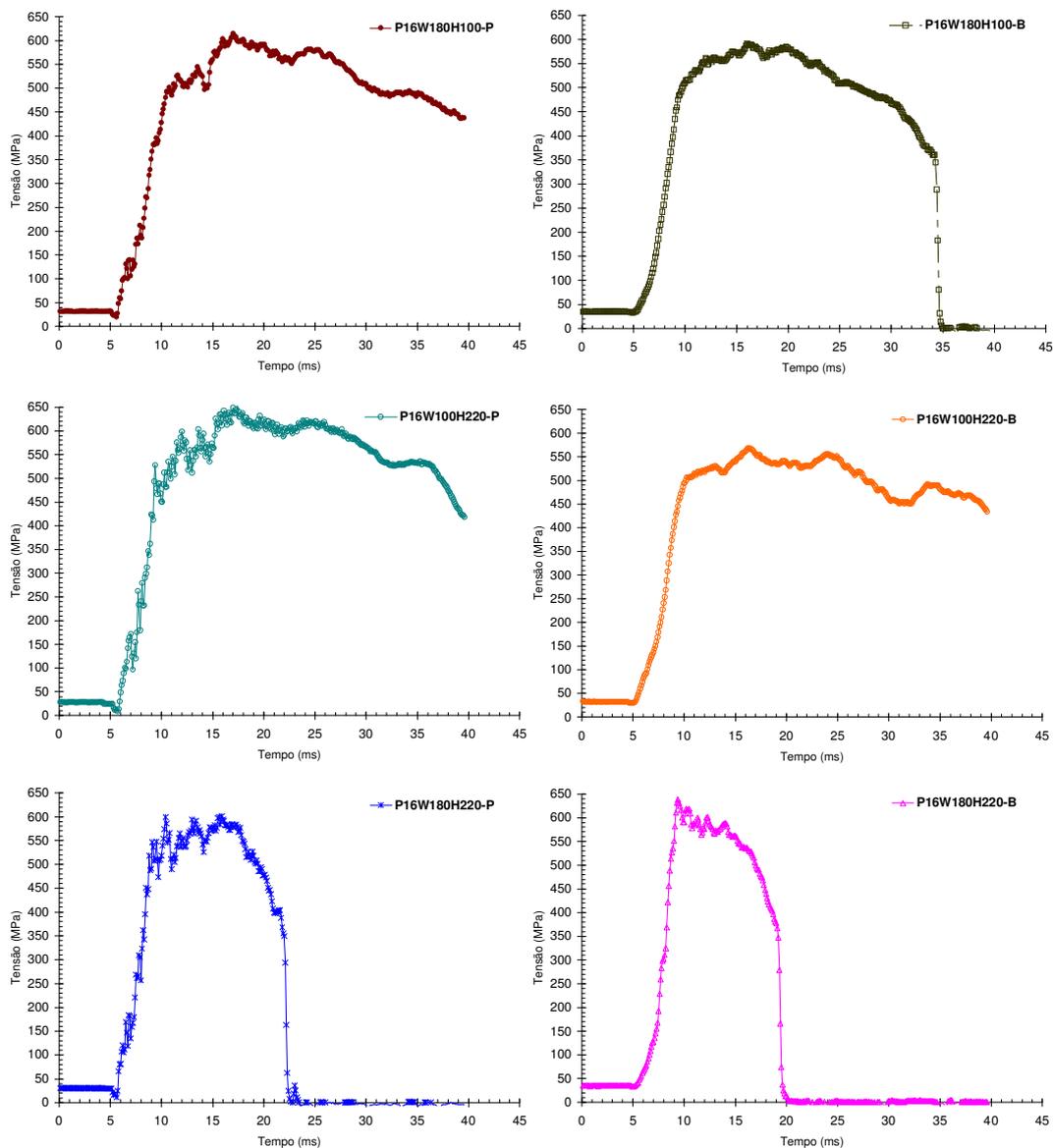


Figura 4.10 – Curvas tensão vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos dos pinos P16 (continuação).

A Figura 4.11 mostra as curvas deformação específica vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos dos pinos P16.

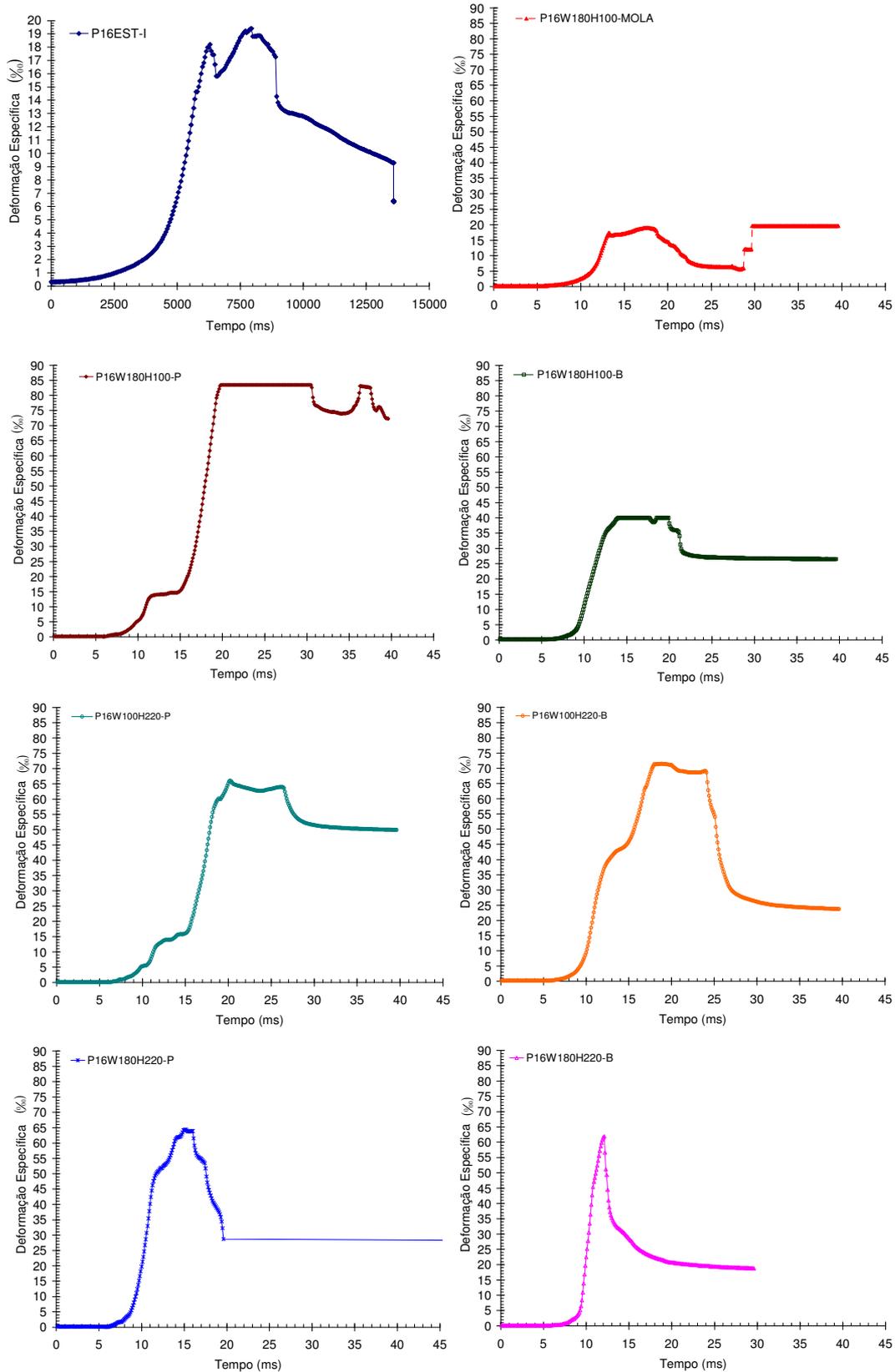


Figura 4.11 – Curvas deformação específica vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos dos pinos P16.

Os valores apresentados das deformações são os valores médios das deformações medidas nos dois EER de cada pino. Ressalta-se que as deformações específicas acima de 20‰ medidas com estes EER não são confiáveis. As curvas deformação vs tempo dos pinos P16W180H100-P e P16W180H100-B apresentam um patamar próximo aos valores de deformação específica de 80‰ e 40‰, respectivamente. Isto ocorreu devido à configuração realizada no sistema de aquisição de dados.

No ensaio estático observou-se um ponto de início de escoamento bem definido. Nos ensaios dinâmicos observou-se que as curvas tensão vs deformação apresentaram alteração, não sendo possível obter com clareza este ponto. Com isso as tensões de início de escoamento foram obtidas de forma aproximada.

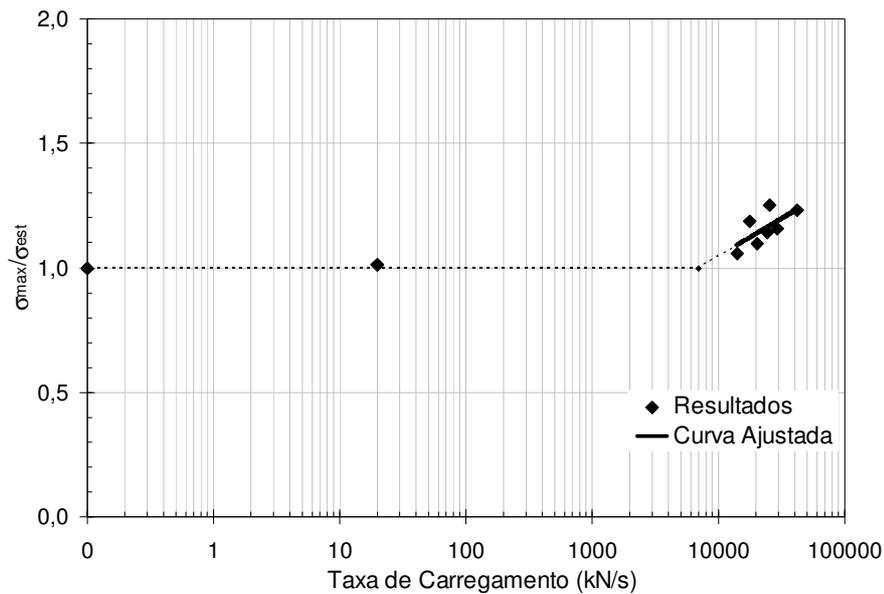
As curvas dos ensaios onde o martelo agiu diretamente sobre o perfil metálico I apresentaram oscilações. Diante disso, foram realizados ensaios com a mesma configuração, alterando-se a condição de impacto do martelo por meio da introdução de uma placa de neoprene. Após a introdução da placa de neoprene as curvas se apresentaram mais regulares. Supõe-se que parte da vibração oriunda do impacto do martelo foi absorvida pela camada de neoprene, reduzindo tanto o coeficiente de restituição elástica quanto a transmissão de ondas de impacto para a viga na interação martelo-viga.

Nos ensaios sem o emprego da placa de neoprene, apesar das oscilações apresentadas, a rampa de carregamento permaneceu praticamente linear. Observa-se que antes do impacto do martelo o pino estava sobe uma carga constante no tempo (peso do perfil metálico I) e que imediatamente após o impacto do martelo a carga no pino diminui durante um intervalo de tempo de aproximadamente 1 ms. Em seguida, o valor da carga cresce rapidamente, porém apresentando oscilações. Tanto as diminuições das cargas imediatamente após o impacto e as oscilações foram causadas pela vibração do perfil despertada pelo impacto do martelo.

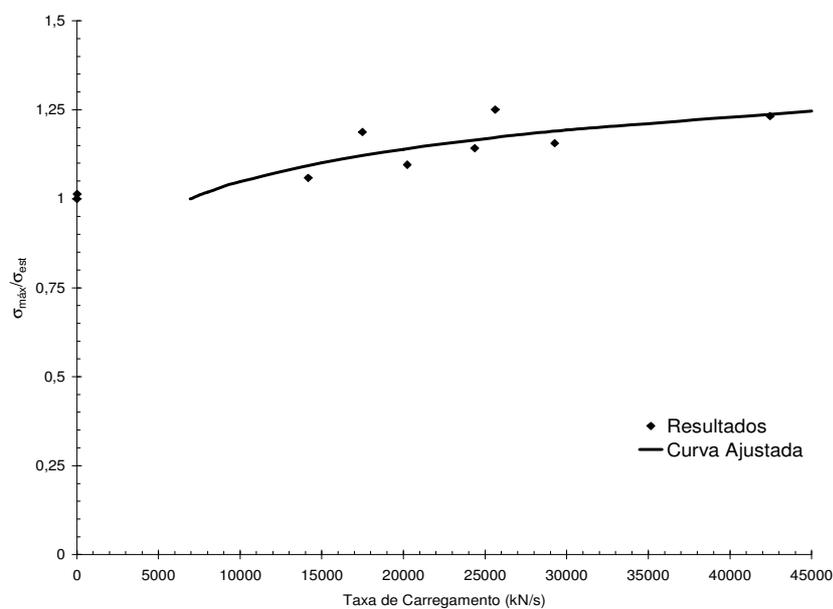
No Anexo C são apresentadas as curvas típicas tensão vs deformação específica e as curvas deformação específica vs tempo com leituras dos dois EER utilizados.

### 4.3.2. Influência da Taxa de Carregamento

A Figura 4.12 mostra a influência da taxa de carregamento sobre resistência à tração dos pinos. Nesta figura  $\sigma_{m\acute{a}x}$  representa a tensão máxima de cada pino, e  $\sigma_{est}$  representa a tensão obtida no ensaio estático.



(a)



(b)

Figura 4.12 – Crescimento relativo de resistência dos pinos vs taxa de carregamento: a) escala logarítmica; b) escala linear.

Na Figura 4.12a observa-se que até a taxa de aproximadamente 6.950 kN/s a resistência do pino não apresenta crescimento significativo. A partir dessa taxa, o crescimento pode ser descrito pela expressão (4.2), obtida pelo método dos mínimos quadrados, válida para  $TC > 650$  kN/s. O coeficiente de correlação foi  $R^2 = 0,4649$ .

$$F_{din,norm} / F_{est,m,norm} = 0,13191 \ln(TC) - 0,1668 \quad (4.2)$$

onde TC é expressa em kN/s.

#### **4.4. Ensaios dos Blocos**

##### **4.4.1. Curvas Força-Tempo**

Os valores das forças máximas, do tempo e das taxas de carregamento alcançadas nos ensaios dos blocos de concreto encontram-se na Tabela 4.4. Todos os blocos romperam pelo arrancamento do cone de concreto.

As curvas que relacionam a força aplicada ao pino do bloco e seu tempo de aplicação são as apresentadas na Figura 4.13. Tal como observado nos ensaios dos pinos P16, as curvas obtidas nos ensaios dos blocos nos quais o martelo incidia diretamente sobre o perfil, também apresentaram um pequeno decréscimo no valor da carga, imediatamente após o impacto.

Os valores da taxa de carregamento, TC, dados na Tabela 4.4 representam a inclinação de uma reta ligando o ponto correspondente ao início do carregamento ao ponto correspondente à carga máxima lida no ensaio.

No Anexo D são apresentadas curvas força vs deformação específica no chumbador e deformação específica vs tempo.

Tabela 4.4 – Resultados gerais obtidos nos ensaios dos blocos de concreto.

BLOCO	$F_{\text{início}}$ (kN)	$F_{\text{máx}}$ (kN)	$\Delta t$ (ms)	TC (kN/s)
B22EST-9	-	56,3	-	0,016
B22EST-11	-	53,4	-	0,015
B22EST-I-5	9,5	57,4	3.686,2	13
B22EST-I-6	9,7	58,0	4.396,3	11
B22W180H100-MOLA-3	7,7	94,7	12,5	6.959
B22W180H100-MOLA-4	6,7	94,1	12,7	6.881
B22W100H220-7	5,5	104,4	4,1	24.105
B22W100H220-8	4,5	121,0	3,6	32.350
B22W180H220-1	4,9	105,1	2,2	45.555
B22W180H220-2	3,5	109,0	2,2	47.923
B22W180H220-13	1,5	119,0	2,14	54.885

$F_{\text{início}}$  - força de início de carregamento.  
 $F_{\text{máx}}$  - força máxima alcançada.  
 $\Delta t$  - tempo de carregamento.  
 TC - taxa de carregamento.

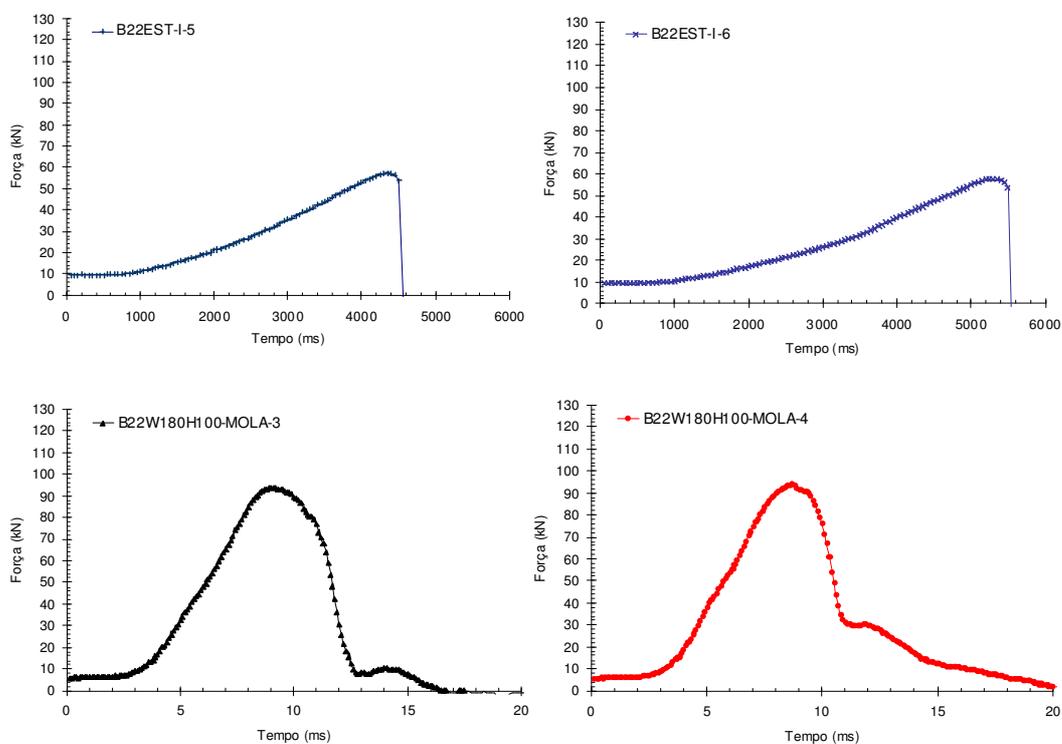


Figura 4.13 – Curvas força vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos dos blocos B22.

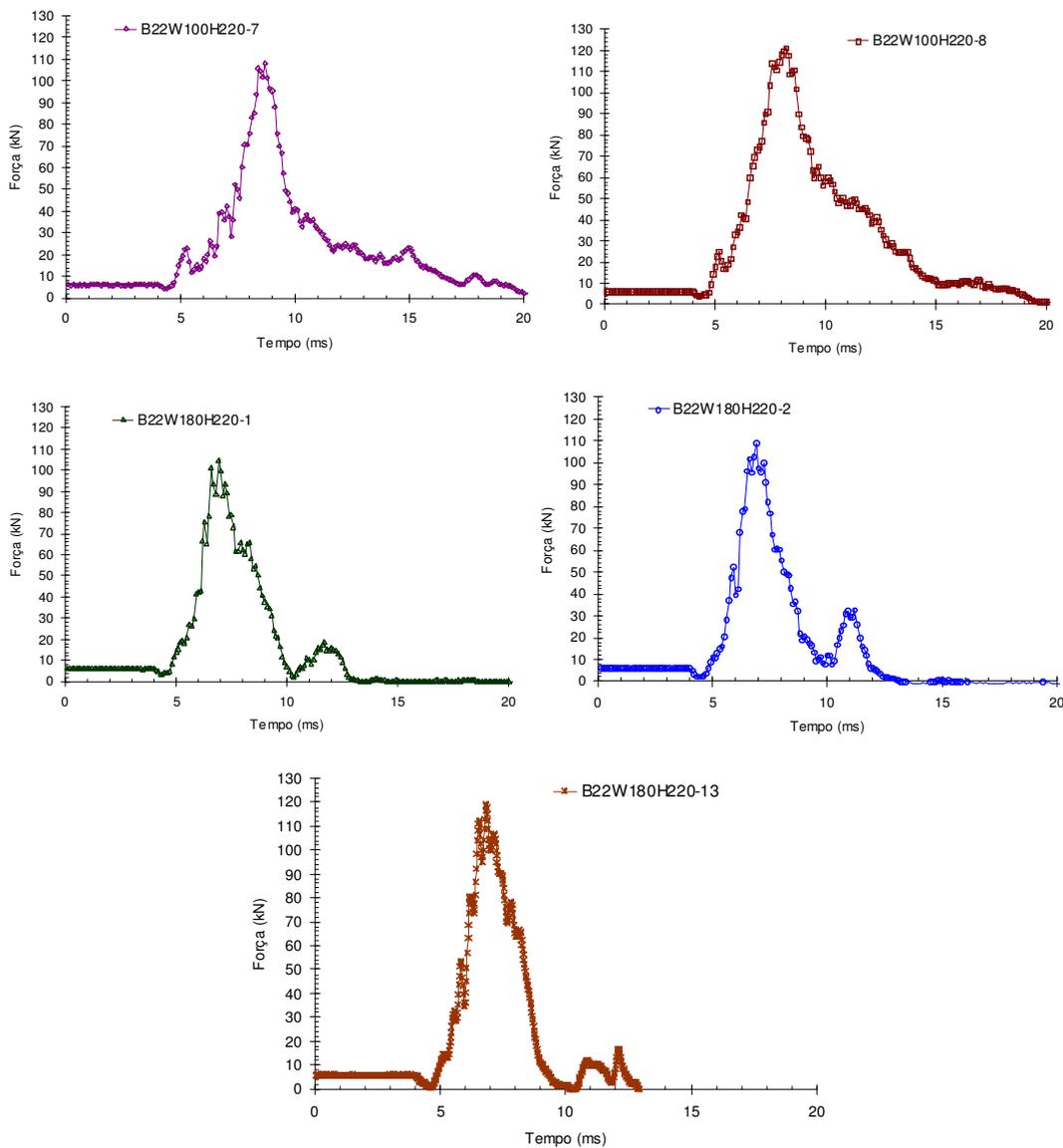


Figura 4.13 – Curvas força vs tempo obtidas nos ensaios dinâmicos dos blocos B22 (continuação).

#### 4.4.2. Área da Superfície do Cone de Ruptura

Uma maneira de se obter informações importantes sobre o funcionamento de um sistema de ancoragem é por meio da análise da área projetada da superfície do cone de ruptura.

Por meio das imagens digitalizadas dos blocos após cada ensaio, foi realizada uma análise da área delimitada pela ruptura do cone de concreto na superfície. De modo a se evitar um efeito de perspectiva nas imagens, as mesmas foram obtidas sempre num plano perpendicular ao plano da superfície do bloco.

As imagens digitalizadas das áreas projetadas das superfícies de ruptura estão apresentadas no Anexo E.

A metodologia adotada para a obtenção dessas áreas, a mesma adotada por Oliveira (2003), foi a seguinte:

- a) as imagens digitalizadas eram importadas para o *software* gráfico *Autocad*;
- b) sobre as imagens eram delineadas as superfícies correspondentes do bloco,  $A_b$ , e a área projetada da superfície do cone de ruptura digitalizada,  $A_p$ , sendo determinadas as áreas nas imagens;
- c) de posse da área real da superfície do bloco,  $A_r$ , obtinha-se a área real da superfície de ruptura projetada,  $A_{rp}$ , a partir da seguinte expressão:

$$A_{rp} = A_r \frac{A_p}{A_b} \quad (4.3)$$

A Tabela 4.5 mostra uma comparação da área de superfície obtida experimentalmente a partir das imagens digitalizadas dos blocos com área de superfície da pirâmide de ruptura de 35° (método CCD). Observa-se que a taxa de carregamento não exerceu influência considerável na área obtida para a superfície do cone de ruptura do concreto.

Tabela 4.5 – Comparação da área superficial experimental com área superficial teórica.

BLOCO	$A_{rp}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{rp,m}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{35^\circ}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{35^\circ}/A_{rp,m}$
B22EST-9	1.924,52	1.937,16	506,25	0,261
B22EST-11	1.949,80			
B22EST-I-5	1.602,04	1.645,45	506,25	0,308
B22EST-I-6	1.688,87			
B22W180H100-MOLA-3	1.726,71	1.868,29	506,25	0,271
B22W180H100-MOLA-4	2.009,88			
B22W100H220-7	1.621,63	1.666,01	506,25	0,304
B22W100H220-8	1.710,38			
B22W180H220-1	1.875,43	1.714,37	506,25	0,295
B22W180H220-2	1.642,46			
B22W180H220-13	1.625,24			
$A_{rp}$ - área da superfície de ruptura projetada obtida experimentalmente. $A_{rp,m}$ - média da área da superfície de ruptura obtida experimentalmente. $A_{35^\circ}$ - área da superfície de ruptura projetada da pirâmide de ruptura de 35°.				

#### 4.4.3. Inclinação do Cone de Ruptura

Para a obtenção dos perfis das superfícies de ruptura foram efetuadas medidas da profundidade do cone em quatro direções, para incrementos de distância equivalente à metade da altura efetiva até uma distância de três vezes a altura efetiva a partir do limite do dispositivo de ancoragem (cabeça do pino). Posteriormente foram traçadas curvas, e obtidos os ângulos de inclinação para cada direção, calculando-se a média para se obter a inclinação de ruptura do cone. Cada ângulo representa a inclinação da reta dada pelos pontos 1 e 2, obtida na região da cabeça do pino de ancoragem em cada direção, pois próximo à superfície os cones apresentaram espalhamento (Figura 4.14).

A Figura 4.15 mostra os perfis dos cones de ruptura dos blocos. Na Tabela 4.6 são apresentados os ângulos obtidos nos ensaios, em cada direção medida, e suas médias.

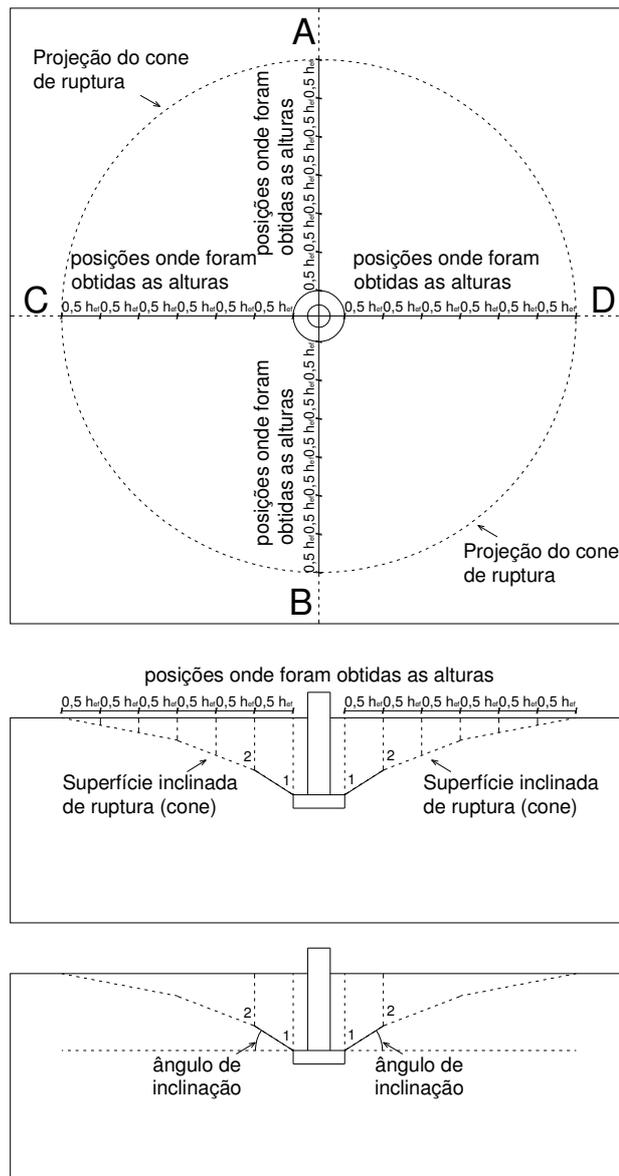


Figura 4.14 – Esquema de obtenção do ângulo de inclinação da superfície de ruptura.

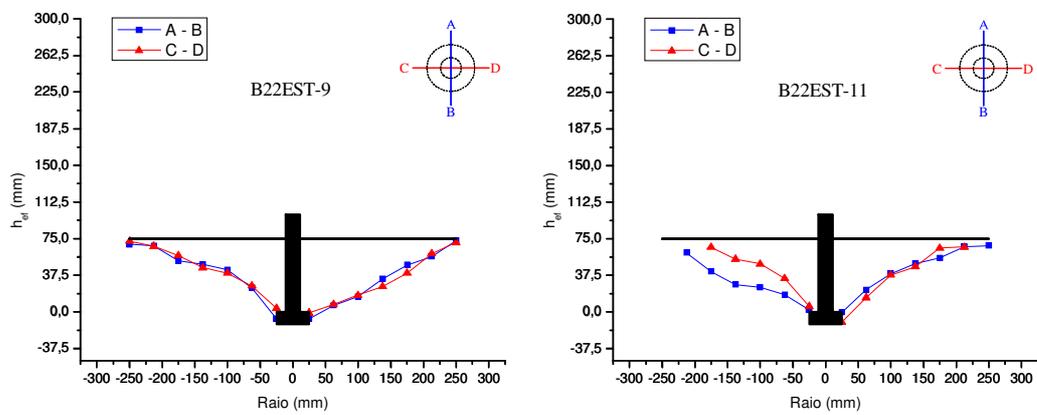


Figura 4.15 – Perfil do cone de ruptura dos modelos ensaiados.

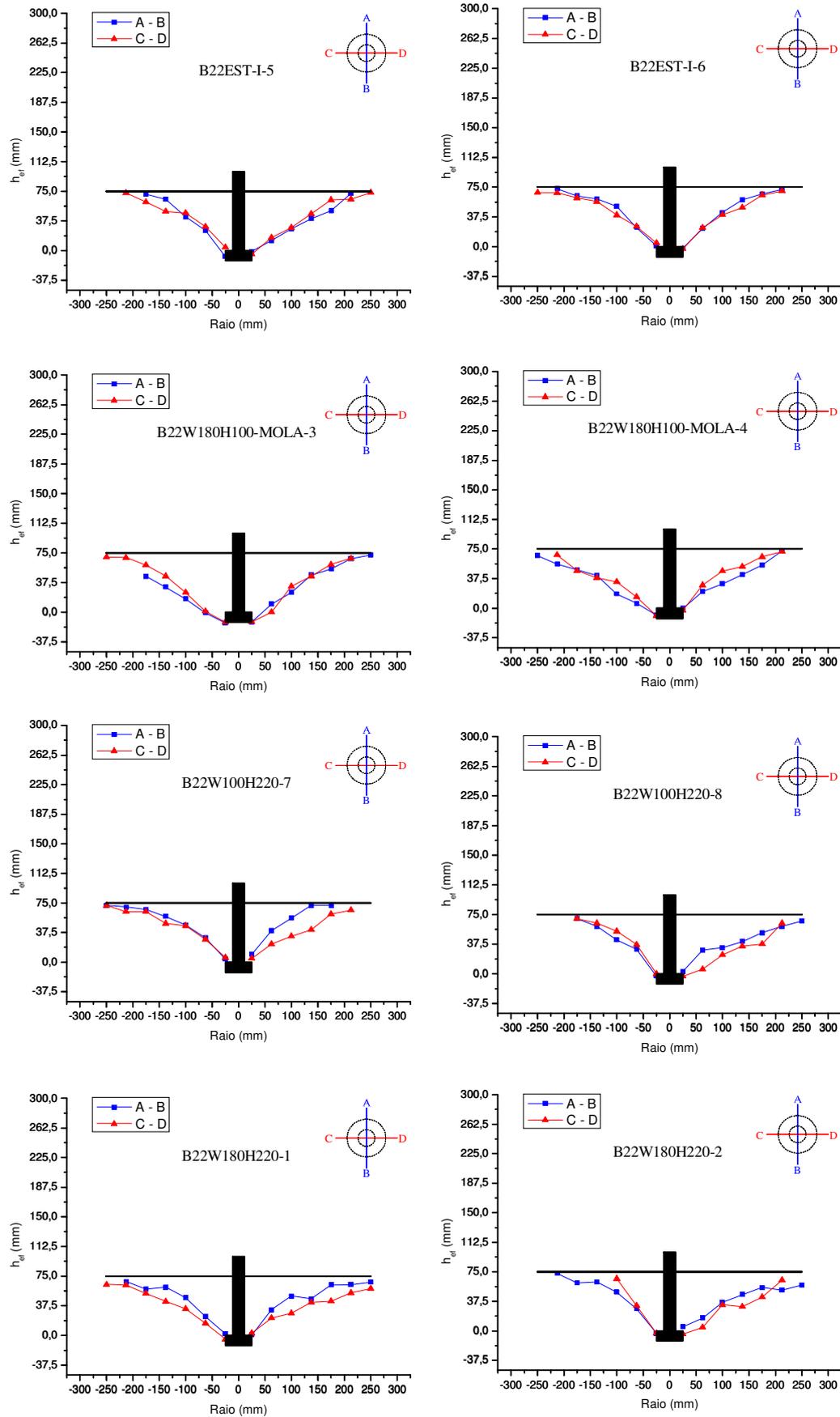


Figura 4.15 – Perfil do cone de ruptura dos modelos ensaiados (continuação).

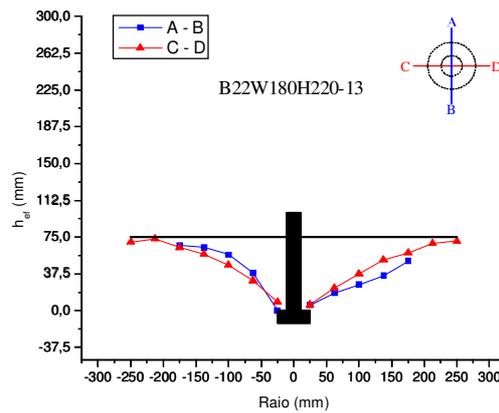


Figura 4.15 – Perfil do cone de ruptura dos modelos ensaiados (continuação).

Tabela 4.6 – Ângulos de inclinação dos cones de ruptura.

BLOCO	ÂNGULO A	ÂNGULO B	ÂNGULO C	ÂNGULO D	ÂNGULO MÉDIO
B22EST-9	40,0°	20,0°	31,1°	13,1°	26,1°
B22EST-11	22,8°	32,0°	37,6°	33,7°	31,5°
B22EST-I-5	41,3°	20,3°	34,8°	29,1°	31,4°
B22EST-I-6	31,7°	33,7°	29,0°	35,5°	32,5°
B22W180H100-MOLA-3	25,4°	30,9°	32,6°	30,8°	29,9°
B22W180H100-MOLA-4	22,2°	29,9°	32,6°	38,2°	30,7°
B22W100H220-7	35,8°	38,7°	31,5°	25,6°	32,9°
B22W100H220-8	42,2°	41,3°	44,6°	13,5°	35,4°
B22W180H220-1	30,4°	40,4°	28,3°	27,0°	31,5°
B22W180H220-2	39,9°	16,9°	43,3°	13,2°	28,3°
B22W180H220-13	45,5°	18,2°	30,5°	24,6°	29,7°

Após a obtenção dos ângulos de inclinação da superfície de ruptura (Figura 4.14), observa-se que nos ensaios estáticos (B22EST e B22EST-I) os ângulos apresentaram pequena variação, se mantendo próximos a 31°, concordando com algumas observações realizadas por Eligehausen e Sawade (1989), que obtiveram inclinações entre 30° e 40°. Estes resultados também estão de acordo com o prescrito pelo método CCD, que adota uma inclinação próxima a 35°. Os resultados estáticos também concordaram com as prescrições da *Tennessee Valley Authority* (Farrow *et alii*, 1995), que prediz que para pinos com altura efetiva  $\leq 127 \text{ mm}$  o ângulo de inclinação fica entre 28° e 45°.

Nos ensaios dinâmicos, em comparação com os ensaios estáticos, os valores apresentaram pouca variação. Constatou-se que à medida que se alterou a taxa de carregamento os ângulos de inclinação não apresentaram grandes alterações.

#### 4.4.4. Comparação com Métodos de Cálculo

Realizou-se uma comparação das forças máximas obtidas nos ensaios dos blocos com as forças estimadas pelos métodos de cálculo abordados no item 2.6.

Utilizou-se da força máxima normalizada pela resistência à compressão simples do concreto, tanto para as forças estáticas quanto para as dinâmicas. A normalização foi realizada da seguinte maneira: cada valor de força obtido experimentalmente foi dividido pela resistência à compressão simples do concreto.

A Tabela 4.7 apresenta a comparação dos valores de força normalizada obtidos nos ensaios com as forças normalizadas estimadas pelos métodos de cálculo. De um modo geral observa-se que houve uma certa variação entre os resultados estimados pelos métodos de cálculo. A variação máxima apresentada foi entre os métodos do ACI 349 (1985) e BODE (BODE *et al* (1985,1987)) em torno de 32%. As diferenças entre os métodos do ACI 349/85 e CCD e entre os métodos CCD e BODE (BODE *et al.* (1985, 1987)) foram 22% e 8%, respectivamente.

Tabela 4.7 – Comparação dos valores da força normalizada obtidos nos ensaios estáticos com os valores das forças normalizadas estimadas pelos métodos de cálculo.

MODELO	$N_{u,norm}$ (kN/MPa)	$N_{u,ACI,norm}$ (kN/MPa)	$N_{u,CCD,norm}$ (kN/MPa)	$N_{u,BODE,norm}$ (kN/MPa)
<b>B22EST-9</b>	2,55	2,07	2,53	2,74
<b>B22EST-11</b>	2,70	2,18	2,67	2,89
$N_{u,norm}$ - força máxima normalizada obtida experimentalmente. $N_{u,ACI,norm}$ - força máxima normalizada estimada pelo método do ACI. $N_{u,CCD,norm}$ - força máxima normalizada estimada pelo método CCD. $N_{u,BODE,norm}$ - força máxima normalizada estimada pelo método BODE.				

Os resultados da Tabela 4.7 mostram que o método CCD apresentou melhor aproximação entre os resultados estáticos teóricos e experimentais e que o método do ACI 349/1985 subestimou a resistência à tração de sistemas de ancoragem (Tabela 4.7). De acordo com Fuchs *et alii* (1995), o motivo de o método CCD ser mais preciso que o método do ACI 349/1985 está relacionado com a diferença de inclinação do cone de concreto adotada nos dois métodos. Onde o método do ACI 349/1985 adota uma inclinação de 45°, o método CCD adota uma inclinação de 35°, produzindo uma melhor aproximação dos resultados.

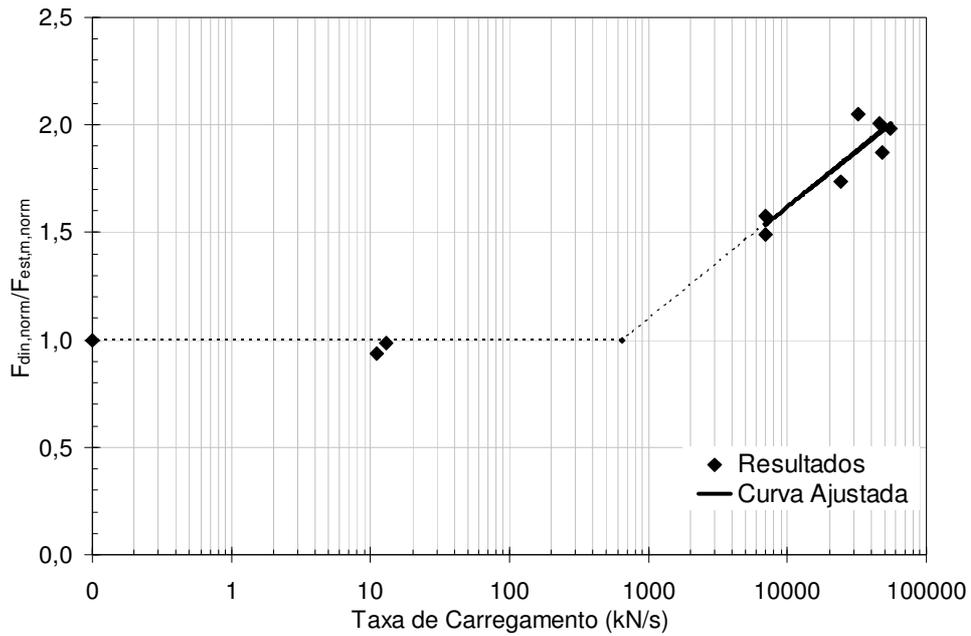
A Tabela 4.8 mostra a relação entre os valores das forças experimentais normalizadas e os valores das forças normalizadas estimadas pelo método CCD. Observa-se que nos ensaios estáticos houve uma variação muito pequena entre as forças máximas estimadas e experimentais. Nos ensaios com impacto, as forças máximas estimadas e obtidas nos ensaios apresentaram dispersão considerável, como esperado. Em comparação com as forças estimadas pelo método CCD, as forças obtidas nos ensaios apresentaram um aumento entre 63% e 114%.

Tabela 4.8 – Relação entre os valores das forças experimentais normalizadas e os valores das forças normalizadas previstas pelo Método CCD.

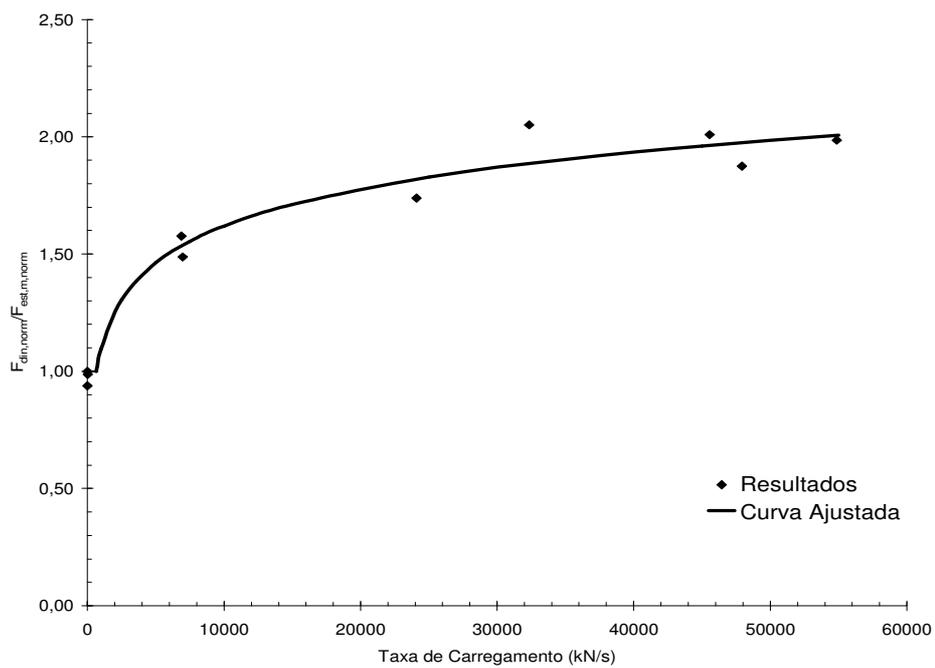
BLOCO	$N_{u,norm}$ (kN/MPa)	$N_{u,CCD,norm}$ (kN/MPa)	$N_{u,norm}/N_{u,CCD}$
B22EST-9	2,55	2,53	1,00
B22EST-11	2,70	2,67	1,01
B22EST-I-5	2,50	2,48	1,01
B22EST-I-6	2,52	2,48	1,02
B22W180H100-MOLA-3	4,00	2,44	1,64
B22W180H100-MOLA-4	3,97	2,44	1,63
B22W100H220-7	4,52	2,47	1,83
B22W100H220-8	5,35	2,50	2,14
B22W180H220-1	4,96	2,58	1,92
B22W180H220-2	5,14	2,58	1,99
B22W180H220-13	5,17	2,48	2,08

#### 4.4.5. Influência da Taxa de Carregamento

A Figura 4.16 mostra a influência da taxa de carregamento sobre a carga de ruptura do cone de concreto. Nesta figura  $F_{din,norm}$  representa as cargas de ruptura experimentais dinâmicas normalizadas pela resistência à compressão do concreto do bloco, e  $F_{est,m,norm}$  representa a média das cargas de ruptura experimentais estáticas normalizadas pela média da resistência à compressão do concreto de cada bloco.



(a)



(b)

Figura 4.16 – Crescimento relativo da carga de ruptura do cone de concreto vs taxa de carregamento: a) escala logarítmica; b) escala linear.

Na Figura 4.16a observa-se que até a taxa de aproximadamente 650 kN/s a resistência do cone de concreto não apresenta crescimento significativo. A partir dessa taxa, o crescimento pode ser aproximado pela expressão (4.4), obtida pelo

método dos mínimos quadrados, válida para  $TC > 650$  kN/s. O coeficiente de correlação foi  $R^2 = 0,8287$ .

$$F_{din,norm} / F_{est,m,norm} = 0,2271 \ln(TC) - 0,4719 \quad (4.4)$$

onde TC é expressa em kN/s.

#### 4.5. Comentários

Os resultados dos ensaios mostraram que a resistência à tração do concreto apresentou crescimento relativo máximo de 50% e a resistência dos pinos apresentou crescimento relativo máximo de 25%. Apesar disto, observou-se nos blocos ocorreu um crescimento relativo de 105%. Quando o pino de ancoragem embutido é carregado, na região situada abaixo do dispositivo de ancoragem, surgem tensões de compressão, e tensões de tração na região oposta e na região inclinada ao dispositivo de ancoragem. Nesta região surge uma fissura inclinada que se propaga a medida em que o concreto excede sua capacidade resistente à tração. Diante disso, supõe-se que o crescimento relativo da resistência nos blocos ocorreu devido a esta distribuição de tensões.

Nos ensaios dos pinos e blocos, as forças não foram medidas próximo aos pinos de ancoragem. Com isso, a força medida pela célula de carga levou um determinado tempo até ser transmitida ao elemento carregado.

Pela teoria de propagação de ondas, tem-se que a força incidente se propaga a uma determinada velocidade, dada pela expressão (2.15), que no aço é de aproximadamente 5.123 m/s. Considerando que a célula de carga esteja interligada ao pino por meio de uma barra de aço, e que sua distância até o dispositivo de ancoragem de cada pino é de aproximadamente 50 cm, o tempo que a onda leva para se propagar da célula até o fim do dispositivo de ancoragem é aproximadamente 0,1 ms, dado por  $L/V$ . Levando em consideração que os tempos de aplicação de força equivalente à força estática foram maiores do que este tempo, nas interfaces de descontinuidade, as forças incidentes se transformam em forças transmitidas de mesma intensidade. Logo, tem-se que as forças medidas pela célula de carga foram aplicadas aos modelos ensaiados.