

4 Apresentação e análise dos resultados

Neste capítulo são feitas a apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios das placas. Inicialmente são analisados os gráficos carga vs. deformação e carga vs. deslocamento de cada placa ensaiada. Em seguida é feito um estudo baseado no ângulo de ruptura e área da superfície de ruptura. Para finalizar, é feita a comparação da carga de ruptura obtida experimentalmente com a carga de ruptura obtida pelas equações apresentadas na Seção 2.7, que trata dos métodos de dimensionamento.

4.1. Resistência do concreto

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 apresentam a resistência à compressão do concreto e a idade correspondente. Cada valor representa a média de três corpos-de-prova. A Figura 4.1 mostra o comportamento dos resultados destes ensaios.

Tabela 4.1 - Resultado da resistência à compressão de acordo com a idade do concreto.

Quantidade de corpo-de-prova	Idade (dias)	Resist. à compressão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
3	3	13,2	1,2
3	7	16,4	1,7
3	21	20,8	0,9
3	31	21,8	0,4
3	44	21,8	0,4
3	52	23,0	0,2
3	70	24,3	1,1
3	80	23,7	1,1
4	101	24,2	0,8

Com base nos resultados experimentais foi possível ajustar um polinômio do 2º grau, relacionando a resistência com o tempo, por meio do qual obtiveram-se as resistências do concreto na idade exata no dia do ensaio. O polinômio obtido é o indicado abaixo:

$$f_c = 18.77 + 0.107t - 0.0005t^2 \quad (4.1)$$

Para t no intervalo: $21 \leq t \leq 101$

onde f_c é a resistência à compressão em MPa e t é a idade do concreto em dias.

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os valores da resistência à compressão do concreto nos ensaios das placas de pino único e placas de quatro pinos respectivamente.

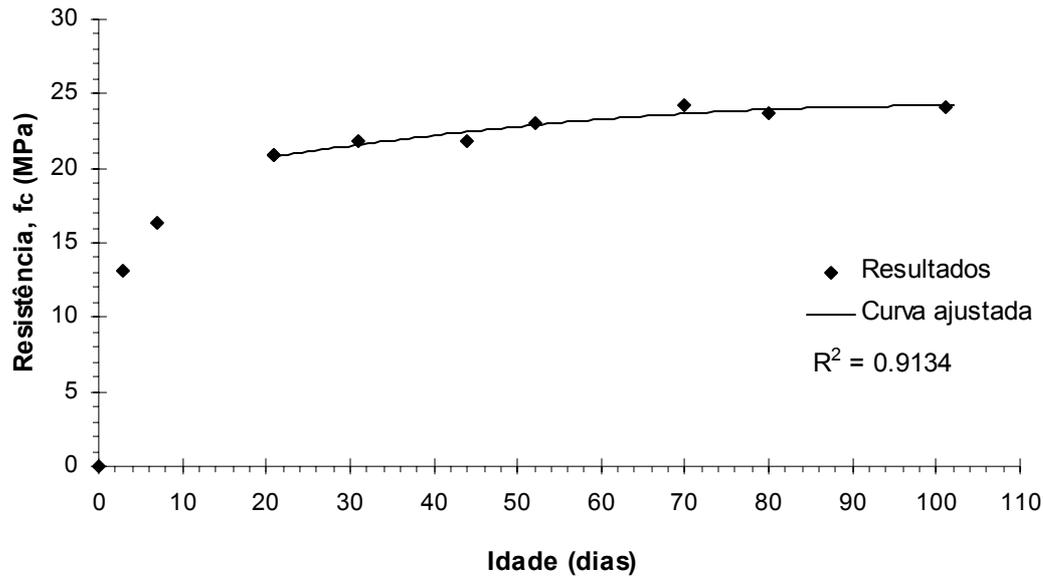


Figura 4.1 - Crescimento da resistência à compressão do concreto com a idade.

Tabela 4.2 - Valores de resistência à compressão do concreto nos ensaios de placas com pino único de acordo com a eq. (4.1).

Placa	Idade do concreto (dias)	Resistência à compressão (MPa)
B1-01	49	22,8
B1-02	51	22,9
B1-03	Ensaio não realizado	Ensaio não realizado
B1-04	57	23,3
B1-05	55	23,2
B1-06	52	23,0
B1-07	65	23,6
B1-08	44	22,5
B1-09	63	23,5
B2-10	31	21,6
B2-11	30	21,5
B2-12	41	22,3
B2-13	30	21,5
B2-14	42	22,4
B2-15	42	22,4

Tabela 4.3 - Valores de resistência à compressão do concreto nos ensaios de placas com quatro pinos.

Placa	Idade do concreto (dias)	Resistência à compressão (MPa)
B3-16	71	23,9
B3-17	70	23,8
B3-18	76	24,0
B3-19	73	23,9
B4-20-21	94	24,4
B4-22-23	86	24,3
B4-24-25	78	24,1
B4-26-27	101	24,5
B4-28-29	99	24,5
B4-30-31	100	24,5

4.2.

Resultados gerais

A Tabela 4.4 apresenta os valores da carga de ruptura, deformação e deslocamento obtidos nos ensaios.

Tabela 4.4 - Valores de carga de ruptura, deformação e deslocamentos obtidos nos ensaios.

Tipo de placa	Placa	N_u (kN)	$N_{u,méd}$ (kN)	ϵ_{pino} (‰)	$\epsilon_{m,pino}$ (‰)	ϵ_{armad} (‰)	$\epsilon_{m,armad}$ (‰)	d1 (mm)	d1 _m (mm)	d2 (mm)	d2 _m (mm)
Placa de canto c/ armadura	B1-01	32,89	31,51	0,73	0,7	0,41	0,36	0,24	0,20	0,42	0,48
	B1-02	30,12		0,74		0,31		0,16		0,50	
	B1-03	-		-		-		-			
Placa de canto	B1-04	37,83	34,75	1,00	0,9	-	-	0,22	0,25	-	0,23
	B1-05	30,88		0,58		-		0,27		0,29	
	B1-06	35,53		1,04		-		0,26		0,16	
Placa isolada	B1-07	92,53	90,02	10,8	7,4	-	-	5,32	3,88	3,11	2,11
	B1-08	93,32		7,3		-		3,08		2,40	
	B1-09	84,22		4,2		-		3,25		0,83	
Placa de bordo c/ armadura	B2-10	58,13	59,47	1,85	1,7	0,57	0,62	1,33	1,45	0,93	0,86
	B2-11	59,16		1,60		0,28		0,83		0,65	
	B2-12	61,13		1,76		1,01		2,18		1,01	
Placa de bordo	B2-13	49,47	50,30	1,02	1,5	-	-	1,00	0,98	-	-
	B2-14	55,19		1,89		-		1,00		-	
	B2-15	46,23		1,53		-		0,94		-	
Placa de quatro pinos	B3-16	137,97	144,04	1,22	1,2	-	-	0,39	0,67	0,28	0,13
	B3-17	144,92		1,15		-		0,41		0,06	
	B3-18	149,23		1,14		-		1,21		0,06	
Pl. quatro pinos c/ armadura	B3-19	228,36	228,36	2,2	2,2	2,3	2,3	2,96	2,96	0,71	0,71
Duas placas d=325mm	B4-20-21	232,02	240,13	0,88	0,8	-	-	1,11	1,21	0,28	0,16
	B4-22-23	234,52		0,81		-		1,14		-	
	B4-24-25	253,86		0,92		-		1,39		0,04	
Duas placas d=200mm	B4-26-27	195,58	198,71	0,71	0,8	-	-	1,26	1,15	0,11	0,11
	B4-28-29	206,91		0,84		-		0,94		0,04	
	B4-30-31	193,64		0,91		-		0,91		0,18	

Onde,

- N_u - Carga de ruptura obtida experimentalmente.
- $N_{u,méd}$ - Carga de ruptura média dos ensaios do mesmo tipo.
- ε_{pino} - Deformação máxima no eixo do pino.
- ε_{armad} - Deformação máxima na armadura de suspensão.
- $d1$ - Deslocamento máximo da placa em relação a um ponto fora do cone
- $d2$ - Deslocamento máximo da placa em relação ao cone de ruptura.
- $\varepsilon_{m,pino}$ - Deformação máxima média no eixo do pino.
- $\varepsilon_{m,armad}$ - Deformação máxima média na armadura de suspensão.
- $d1_m$ - Deslocamento máximo médio da placa em relação a um ponto fora do cone.
- $d2_m$ - Deslocamento máximo médio da placa em relação ao cone de ruptura.

4.2.1.

Placas isoladas com pino único

As placas B1-07, B1-08 e B1-09 foram ensaiadas com idade do concreto de 65, 44 e 63 dias respectivamente. Esta série de ensaios foi a que apresentou um maior intervalo entre a realização de ensaios em uma mesma série. Entretanto, a influência da idade do concreto no valor da carga de ruptura para este caso foi da ordem de 2% (de acordo com a Eq. 2.1), sendo que a carga de ruptura obtida nos ensaios apresentou uma variação em torno de 10%.

A Figura 4.2 mostra as curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios de placas isoladas de pino único. Na Figura 4.2 pode-se notar que o eixo do pino foi solicitado além do limite de escoamento do aço, apresentando deformações máximas na ruptura em torno de 7 %. Observa-se ainda que nos três ensaios as curvas carga vs. deformação apresentam um comportamento praticamente linear até o valor de carga próximo a 52 kN.

A Figura 4.3 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura e a Figura 4.4 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura, conforme apresentado na Seção 3.3.2, para os três ensaios de placas isoladas de pino único. Observando estas duas figuras nota-se inicialmente a existência de certa aderência do sistema de ancoragem, uma vez que o deslocamento do eixo do pino em relação ao cone de ruptura é praticamente inexistente para carga até 30 kN. Os deslocamentos máximos observados apresentaram grande variação, tanto para as medições fora do cone de ruptura quanto para as medições do deslocamento da placa em relação ao cone.

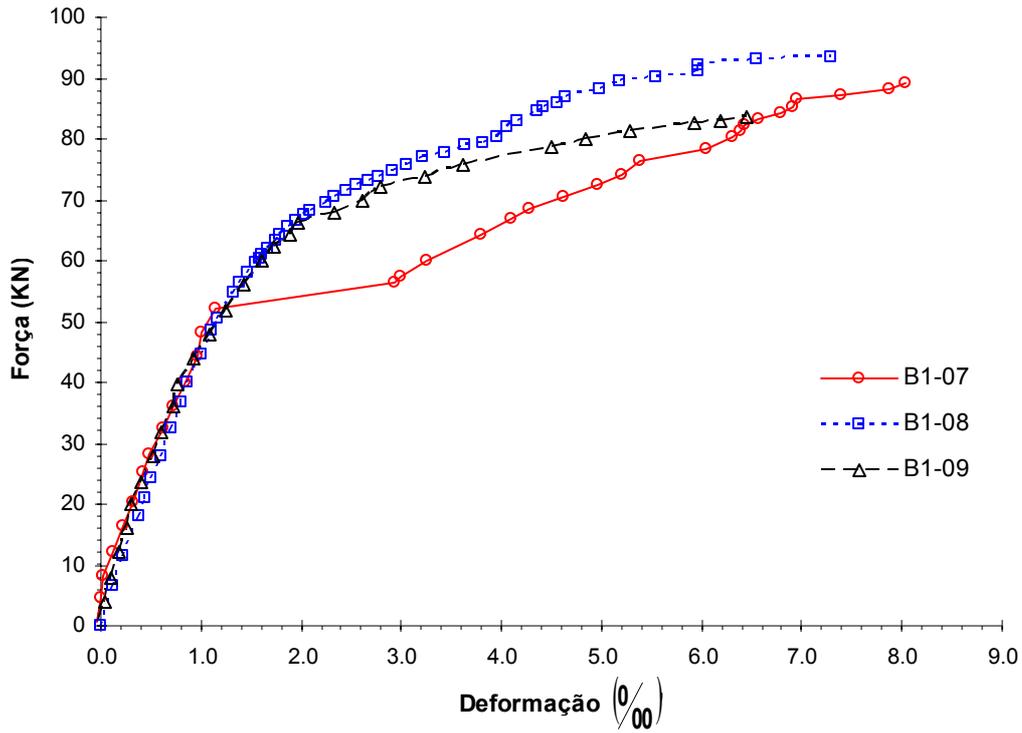


Figura 4.2 - Curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios de placas isoladas de pino único.

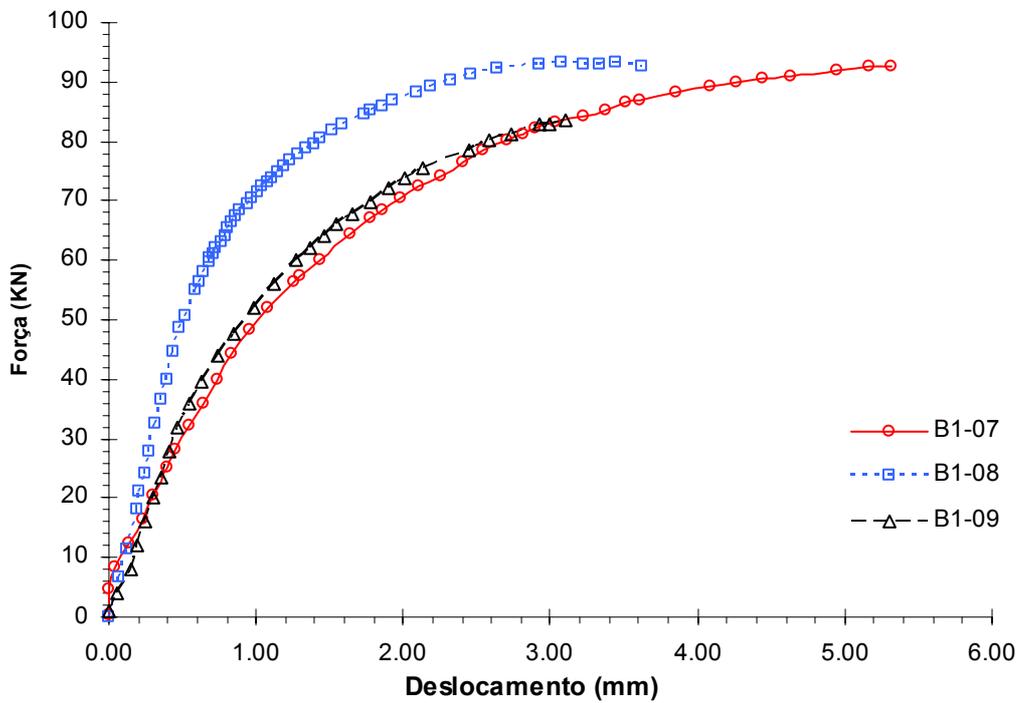


Figura 4.3 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura, para os três ensaios de placas isoladas de pino único.

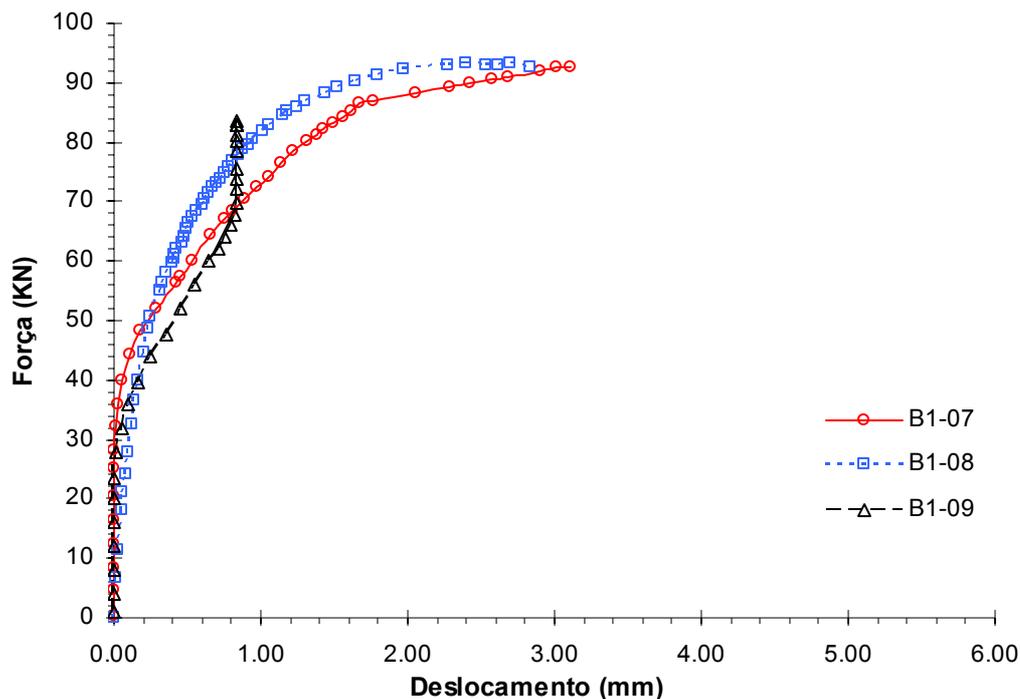


Figura 4.4 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura, para os três ensaios de placas isoladas de pino único.

4.2.2. Placa de bordo com pino único

A Figura 4.5 mostra as curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios de placas de pino único próximo a um bordo. As deformações apresentaram valores bem inferiores aos obtidos na série de ensaios referentes as placas isoladas de pino único, sugerindo uma menor sollicitação do eixo da barra do chumbador.

A Figura 4.6 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura.

Esta série de ensaios foi a que deu início ao estudo experimental, e como a maneira de instrumentar os ensaios ainda se encontrava em fase de estudo, a série não foi instrumentada para a obtenção do deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura.

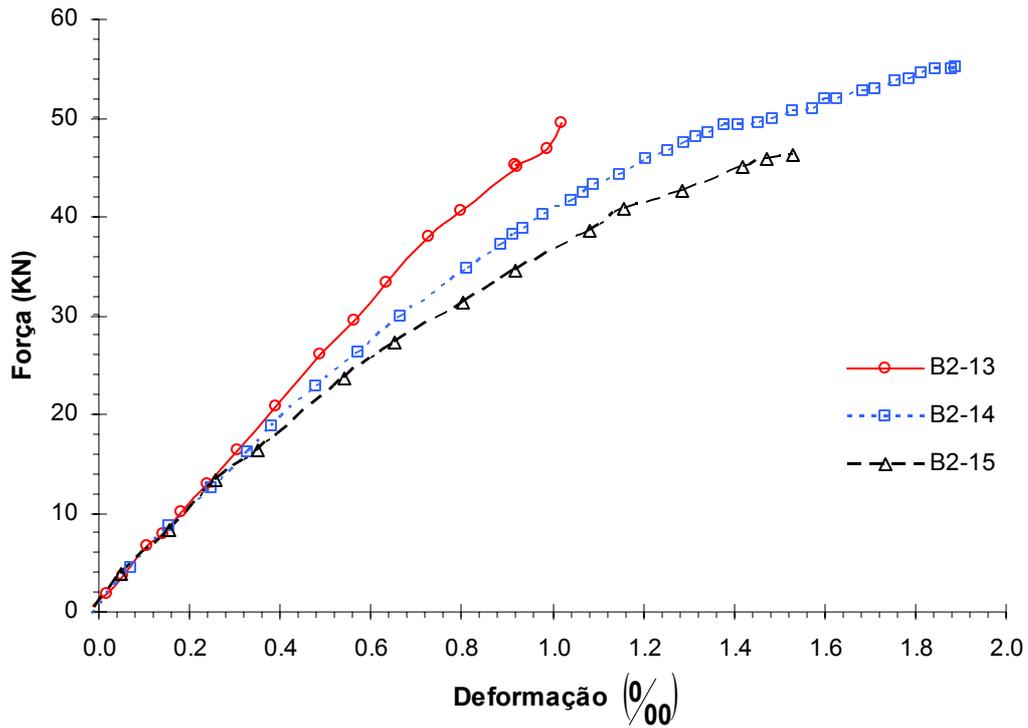


Figura 4.5 - Curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios de placas de pino único de bordo.

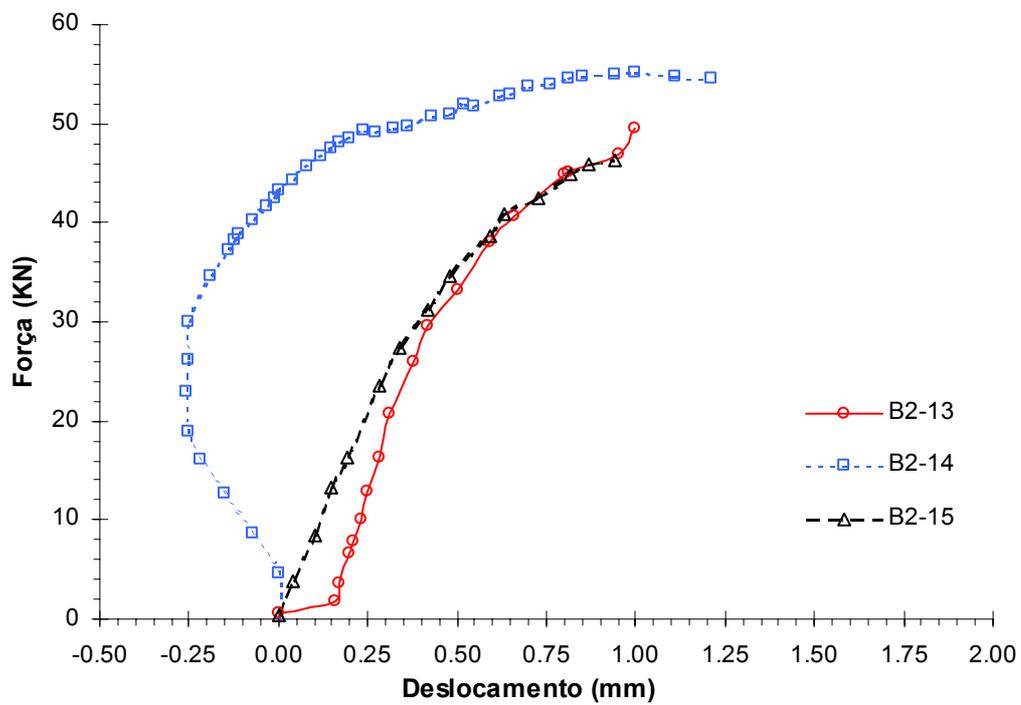


Figura 4.6 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura, para os três ensaios de placas de pino único de bordo.

Na curva referente à placa B2-14, mostrada na Figura 4.6, observa-se um comportamento atípico, ou seja, até a carga de aproximadamente 25 kN o deslocamento é negativo. Uma possível explicação para este comportamento pode ser atribuída a movimentação de acomodação da placa, ou do ponto onde foi instalado o LVDT, durante a aplicação do carregamento

4.2.3.

Placa de bordo com pino único, com armadura de suspensão

A Figura 4.7 mostra as curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios de placas com pino único de bordo, com armadura de suspensão e a Figura 4.8 mostra as curvas carga vs. deformação na armadura de suspensão.

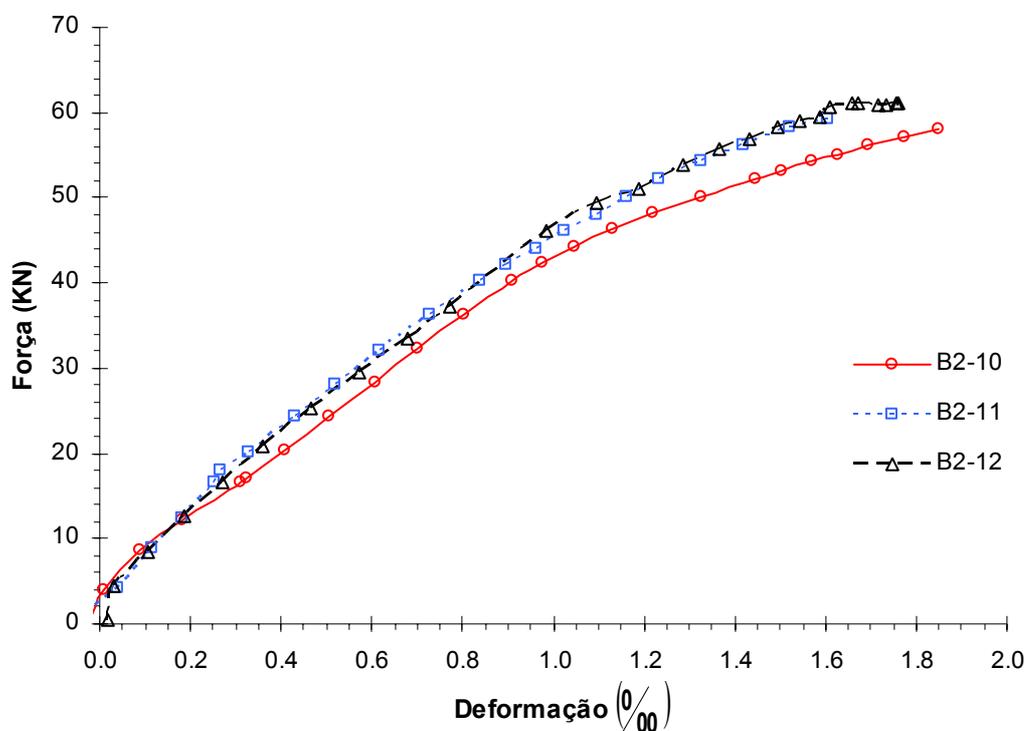


Figura 4.7 - Curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios de placas de pino único de bordo, com armadura de suspensão.

A Figura 4.9 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura e a Figura 4.10 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura para os três ensaios de placa com pino único próximo a um bordo, com armadura de suspensão.

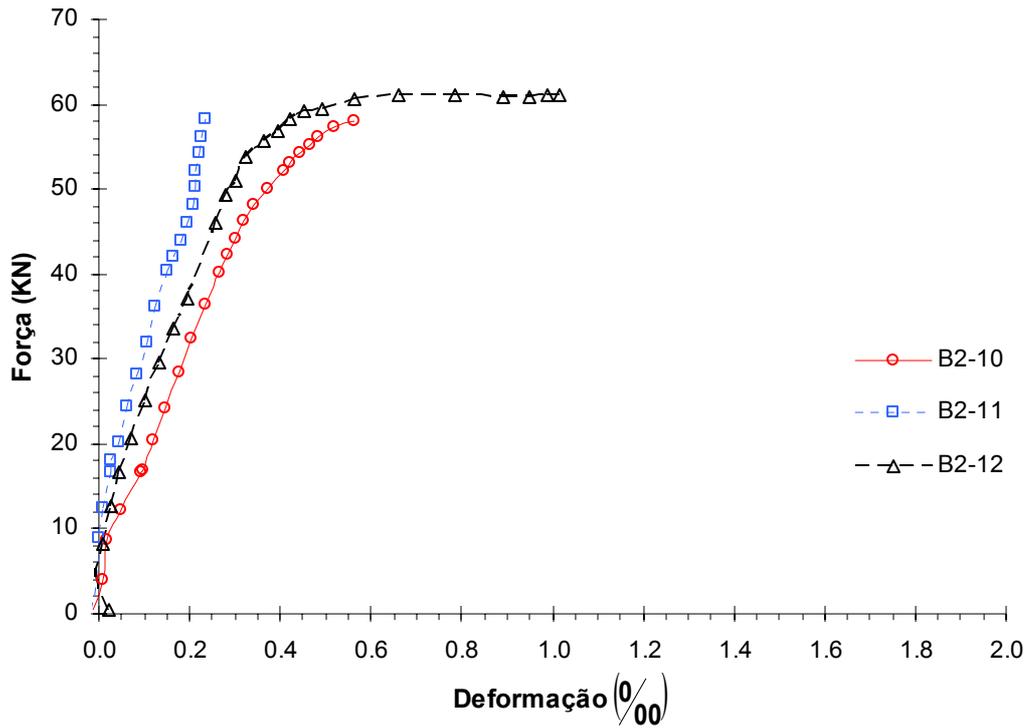


Figura 4.8 - Curvas carga vs. deformação na armadura de suspensão para os três ensaios de placas de pino único de bordo.

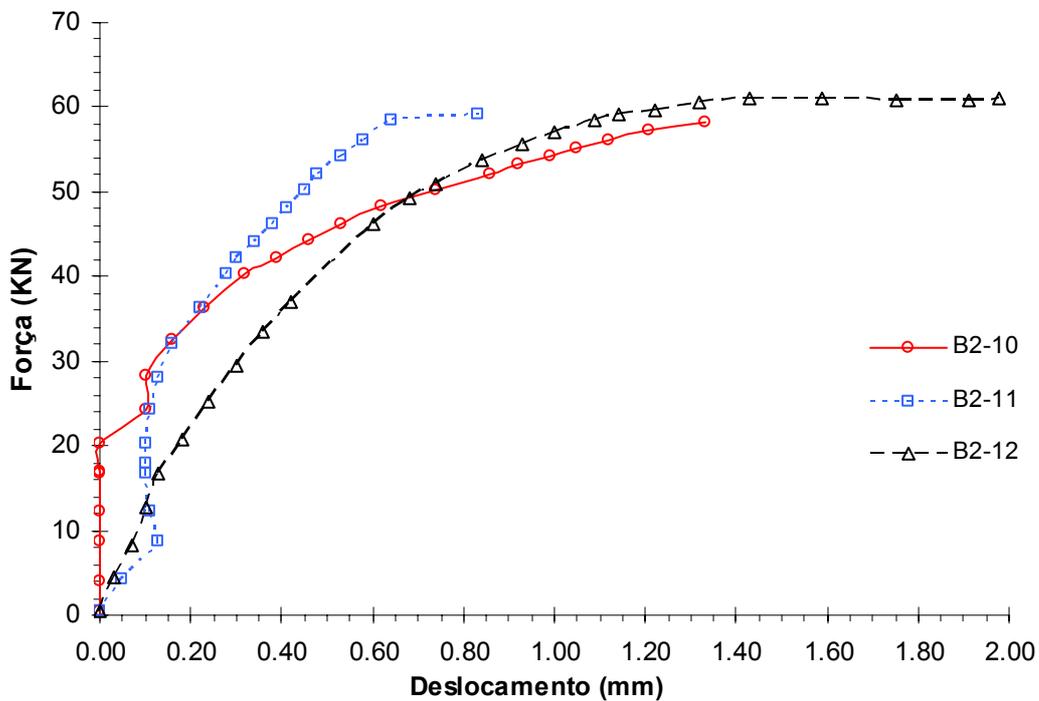


Figura 4.9 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura, para os três ensaios de placas com pino único próximo a um bordo, com armadura de suspensão.

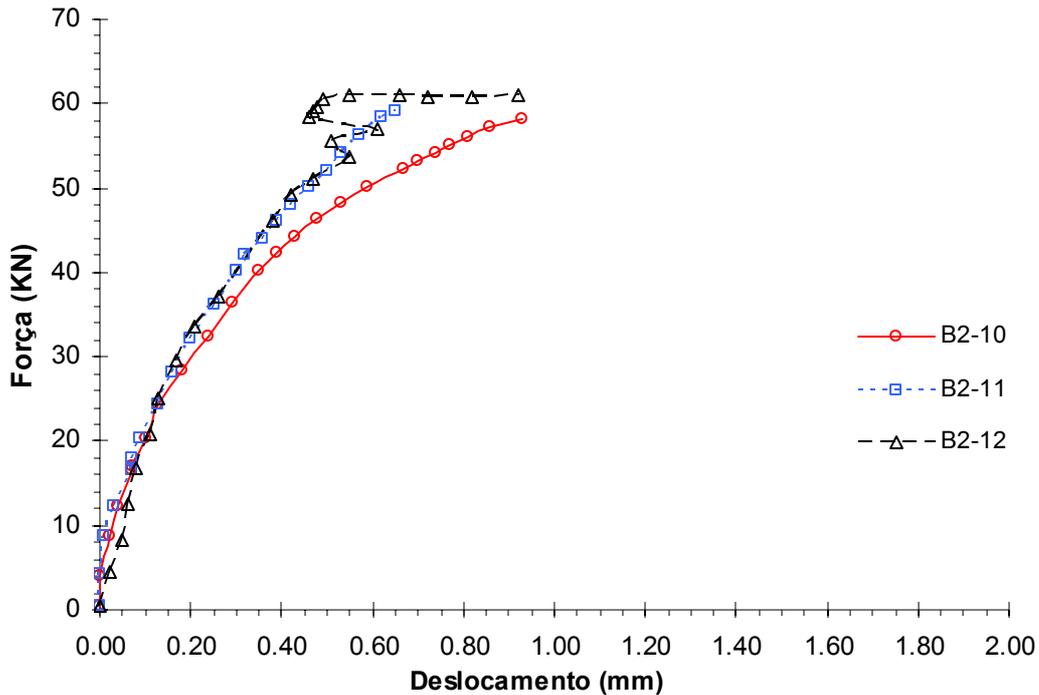


Figura 4.10 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura, para os três ensaios de placas com pino único próximo a um bordo, com armadura de suspensão.

4.2.4. Placa de canto com pino único

A Figura 4.11 mostra as curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios de placas de pino único de canto.

A Figura 4.12 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura e a Figura 4.13 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura. Observa-se que não há deslizamento inicial do pino, como mostram as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura. Devidos a problemas em um dos LVDT, as medidas de deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura não foram registradas para a placa B1-04.

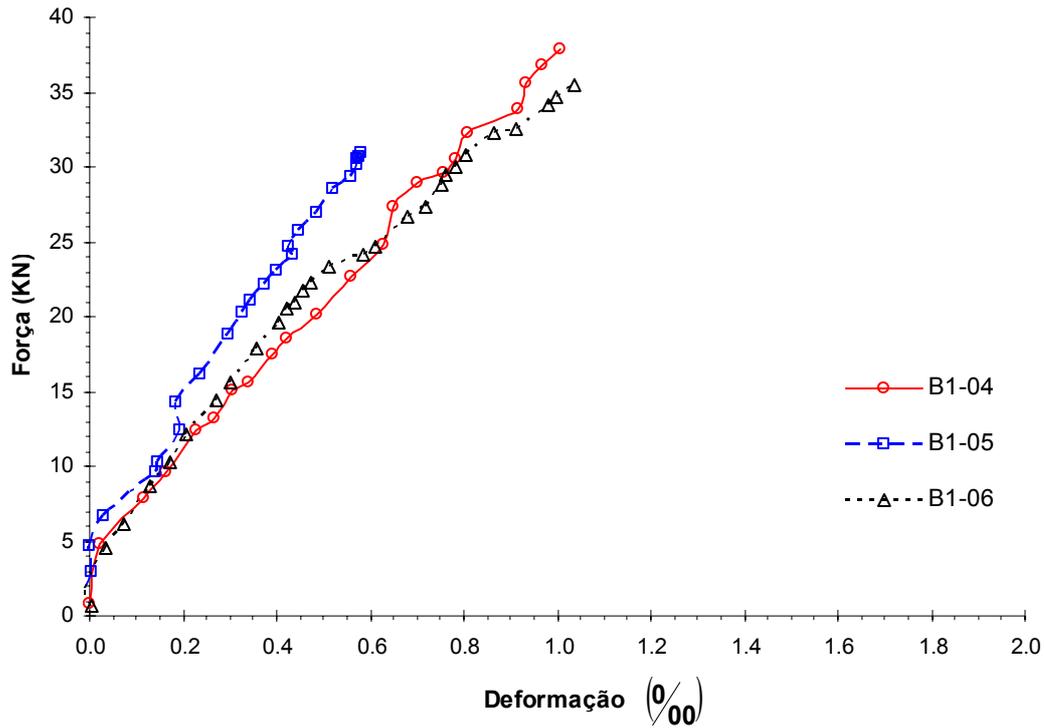


Figura 4.11 - Curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios de placas de pino único de canto.

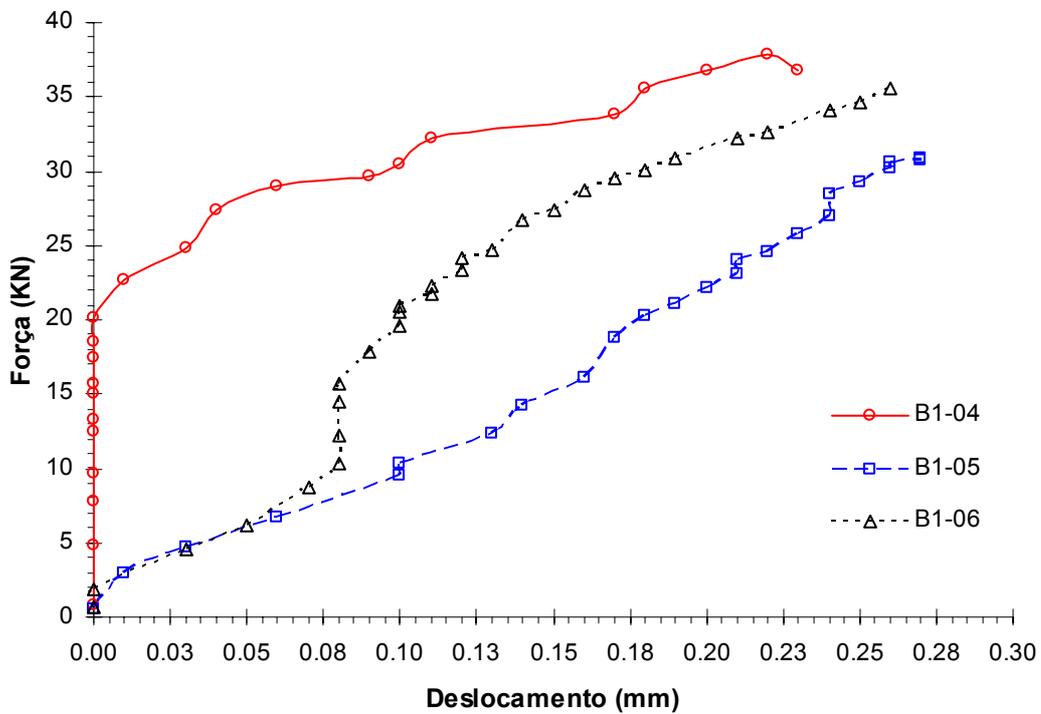


Figura 4.12 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura, para os três ensaios de placas de pino único de canto.

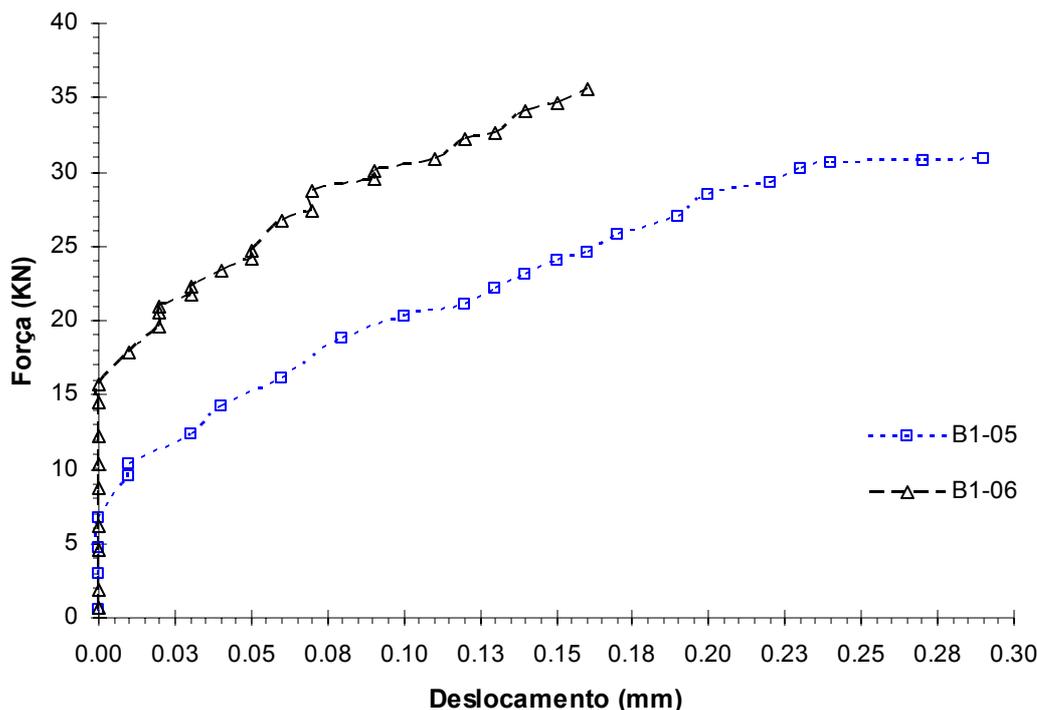


Figura 4.13 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura, para os três ensaios de placas de pino único de canto.

4.2.5.

Placa de canto com pino único, com armadura de suspensão

A Figura 4.14 mostra as curvas carga vs. deformação no pino para os dois ensaios de placas de pino único de canto, com armadura de suspensão e a Figura 4.15 mostra as curvas carga vs. deformação na armadura de suspensão.

A Figura 4.16 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura e a Figura 4.17 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura. Os resultados dos deslocamentos para estes dois ensaios se mostraram incoerentes, uma vez que os deslocamentos da placa com relação a um ponto fora do cone de ruptura apresentaram valores inferiores aos deslocamentos da placa em relação ao cone de concreto. Este fato pode ser atribuído ao posicionamento dos transdutores de deslocamento (confira a Seção 3.3.2), que por estarem situados em pontos opostos sobre a placa, ficam sujeitos aos movimentos de acomodação da placa durante a aplicação do carregamento. A Figura 4.18 mostra a influência do posicionamento para estes ensaios.

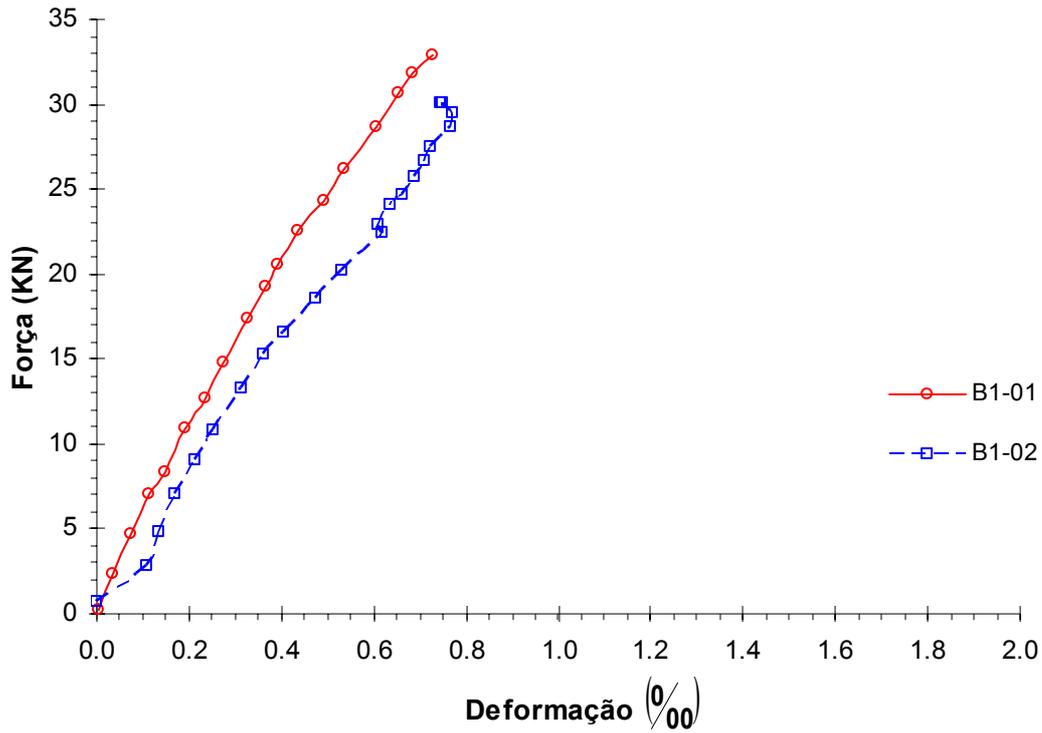


Figura 4.14 - Curvas carga vs. deformação no pino para os dois ensaios de placas de pino único de canto, com armadura de suspensão.

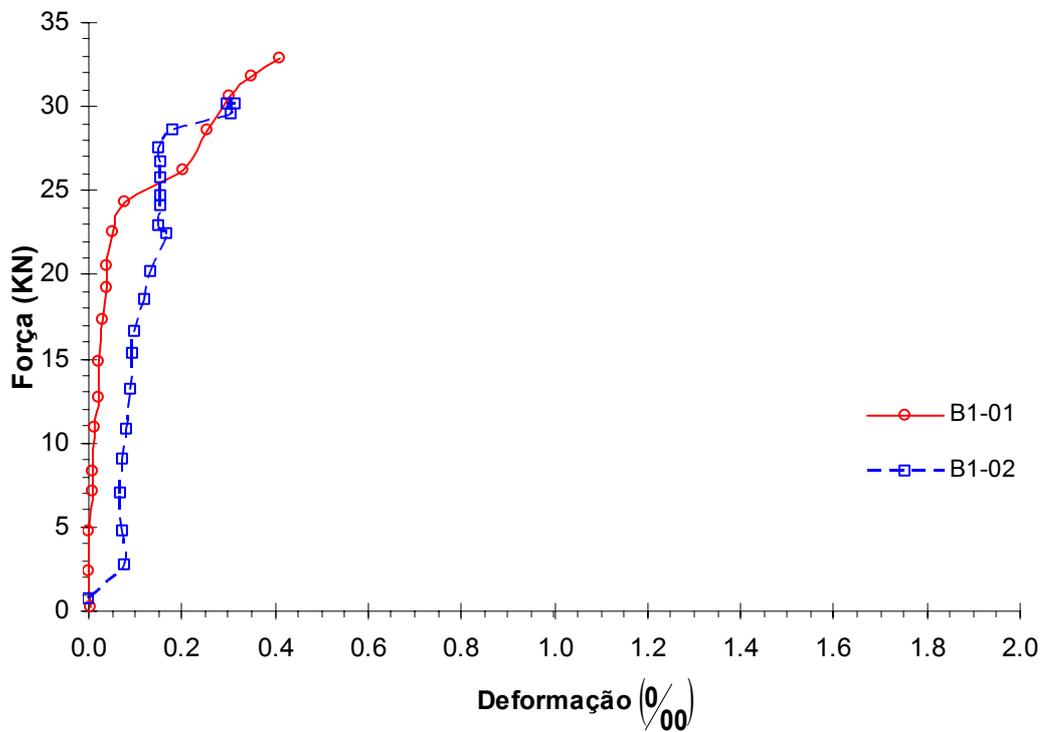


Figura 4.15 - Curvas carga vs. deformação na armadura de suspensão para os dois ensaios de placas de pino único de canto.

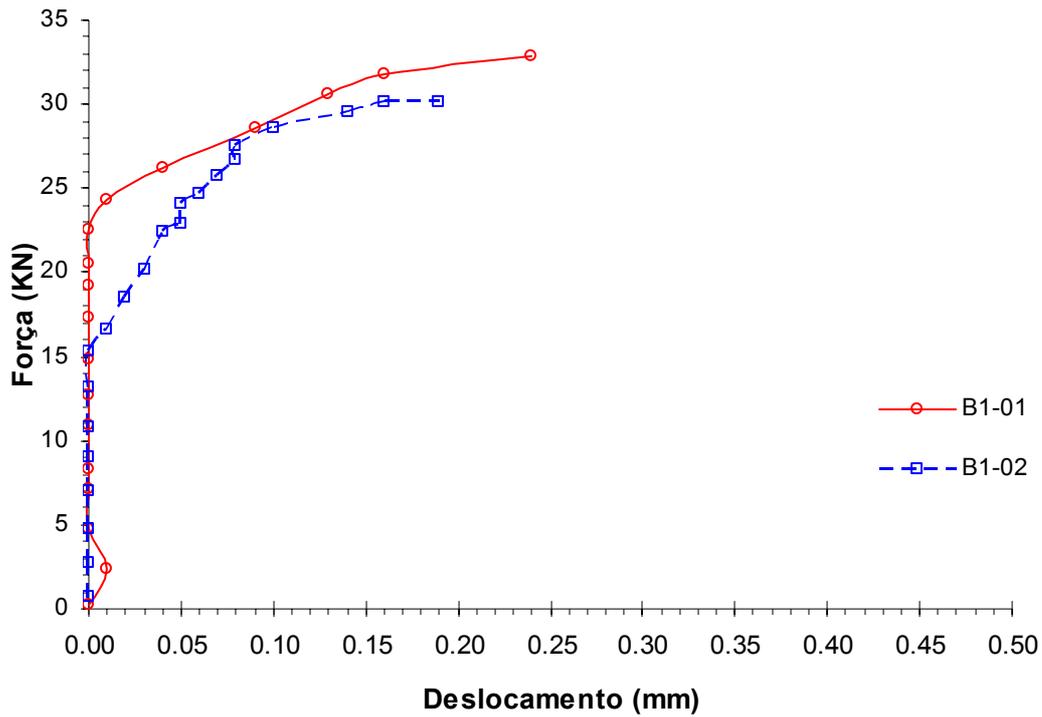


Figura 4.16 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura, para os dois ensaios de placas de pino único de canto, com armadura de suspensão

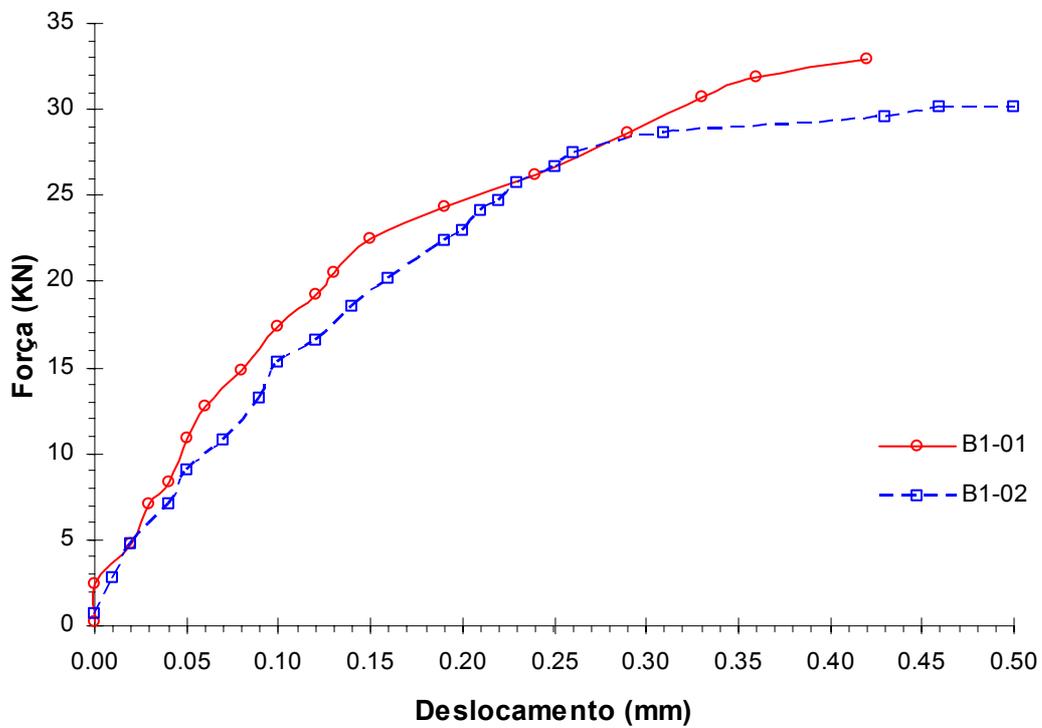


Figura 4.17 - Curvas carga vs. da placa em relação ao cone de ruptura, para os dois ensaios de placas de pino único de canto, com armadura de suspensão .



Figura 4.18 - Influência do posicionamento nas medidas de deslocamento para os ensaios de pino único de canto com armadura de suspensão.

4.2.6. Placa de quatro pinos

A Figura 4.19 mostra as curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios de placas de quatro pinos. As deformações medidas no eixo do pino foram inferiores as obtidas na série de ensaios referentes às placas de pino único isolado, sugerindo uma menor sollicitação do eixo do pino nestes casos.

A Figura 4.20 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura e a Figura 4.21 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura. Observam-se menores níveis de deslocamentos neste sistema de ancoragem de quatro pinos, pois cada pino do grupo é sollicitado apenas com 40% da carga de ruptura de uma placa isolada de pino único. Lembrando que este valor de 40% para cada pino deve-se a redução promovida pelo efeito de agrupamento de pinos, baseada na carga de ruptura média nos ensaios, válido para as dimensões geométricas apresentadas nas Seções 3.2.1 e 3.2.2.

A Figura 4.20 mostra um comportamento diferenciado para os deslocamentos obtidos no ensaio da placa B3-16 onde se observa os deslocamentos negativos até um nível de carga em torno de 50 kN o que pode ser atribuído ao movimento de acomodação da placa, ou do ponto de apoio do LVDT, durante a realização do ensaio.

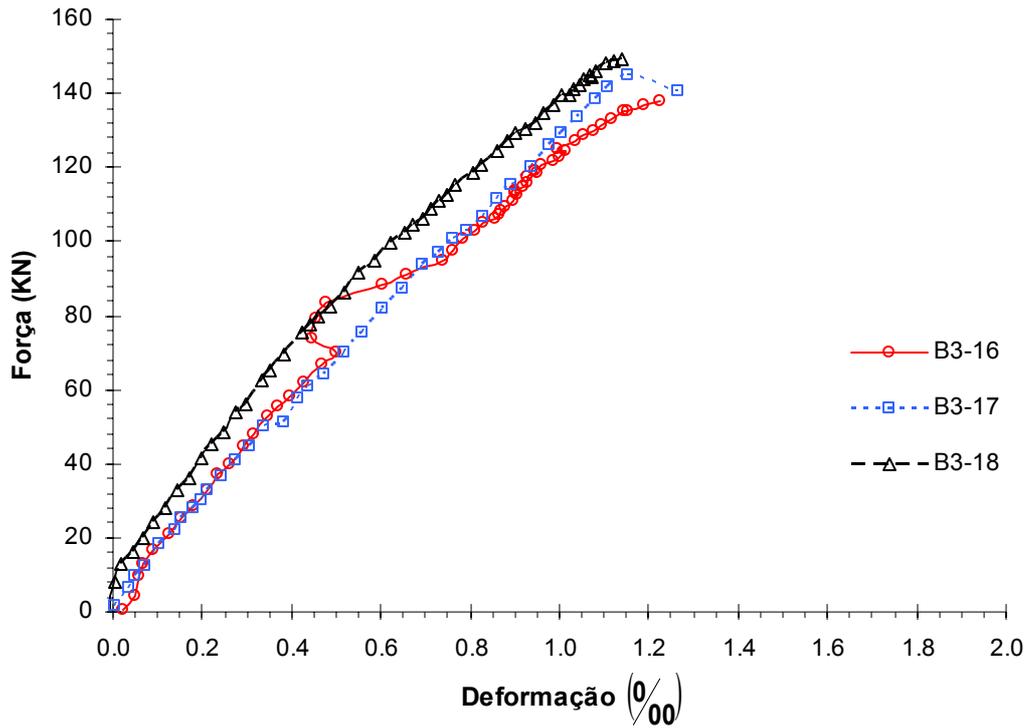


Figura 4.19 - Curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios de placas de quatro pinos.

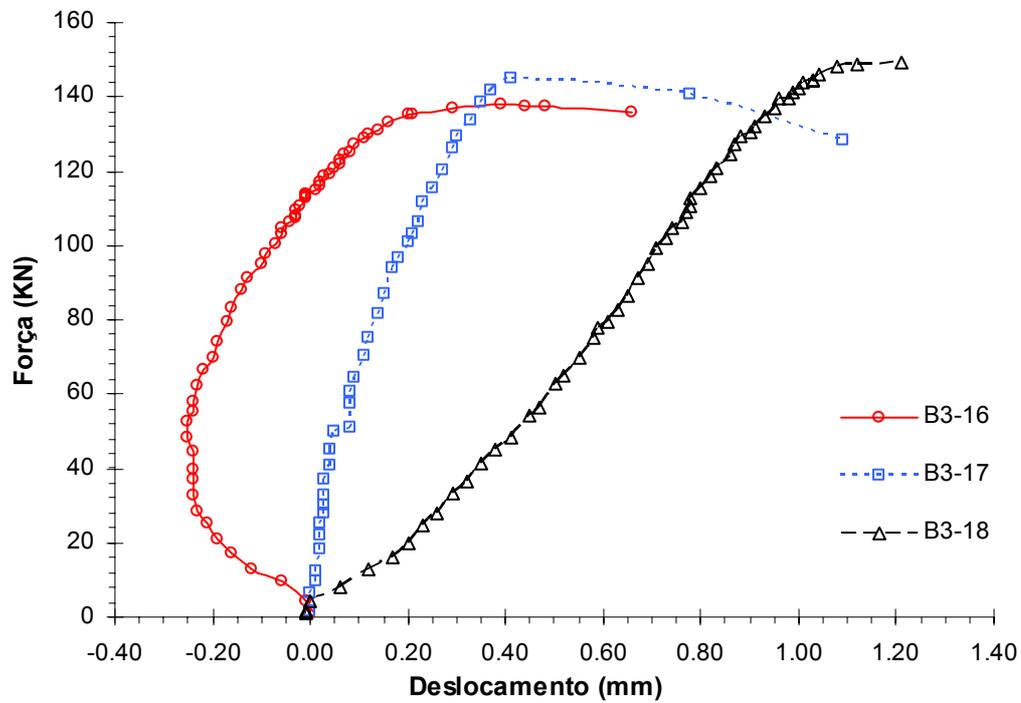


Figura 4.20 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura, para os três ensaios de placas de quatro pinos.

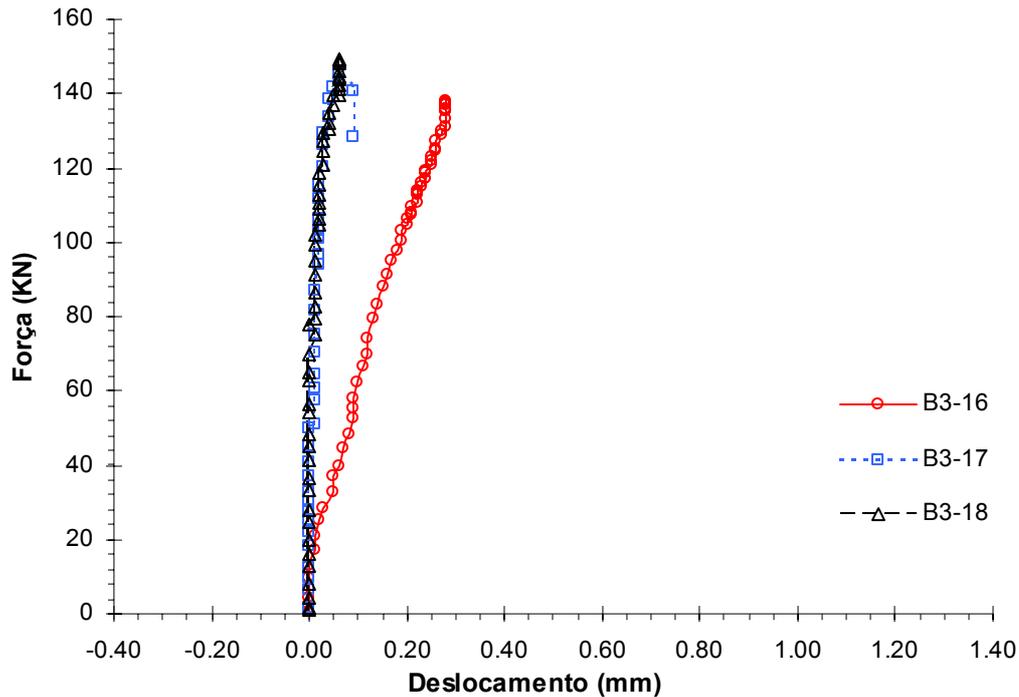


Figura 4.21 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura, para os três ensaios de placas de quatro pinos.

4.2.7. Placa de quatro pinos, com armadura de suspensão

A Figura 4.22 mostra a curva carga vs. deformação no pino para o ensaio de uma placa de quatro pinos com armadura de suspensão e a Figura 4.23 mostra a curva carga vs. deformação nas armaduras de suspensão.

Os níveis de deformações, principalmente nas armaduras de suspensão, mostram que as armaduras de suspensão foram efetivamente solicitadas. A prova disso é o aumento da eficiência apresentado pela introdução das armaduras de suspensão na placa com quatro pinos, ou seja, o sistema de ancoragem com armadura de suspensão apresentou um aumento de 59% no valor da carga de ruptura quando comparado à placa de quatro pinos sem armadura de suspensão.

A Figura 4.24 mostra a curva carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura e a Figura 4.25 mostra a curva carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura, para o ensaio da placa de quatro pinos com armadura de suspensão.

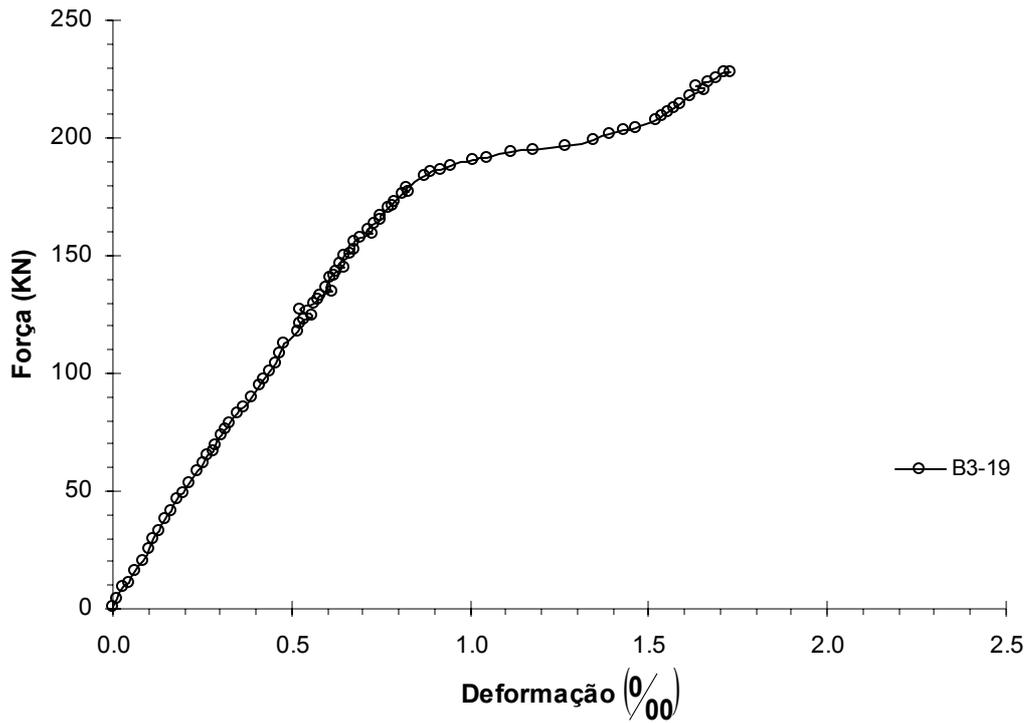


Figura 4.22 - Curva carga vs. deformação no pino para o ensaio da placa de quatro pinos, com armadura de suspensão.

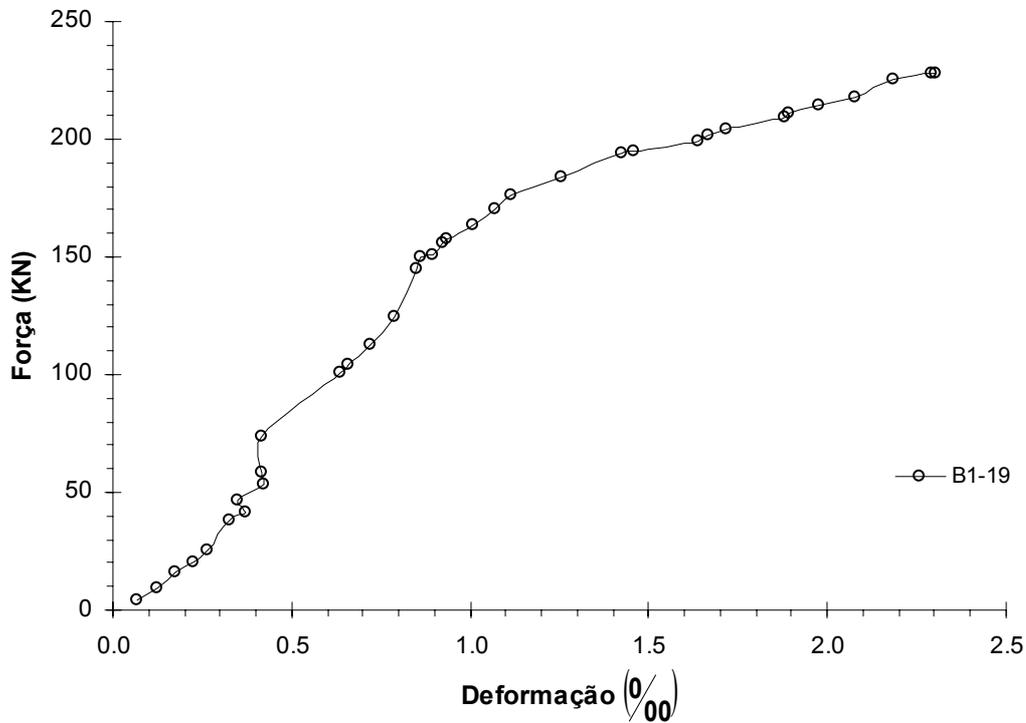


Figura 4.23 - Curva carga vs. deformação nas armaduras de suspensão para placas de quatro pinos, com armadura de suspensão.

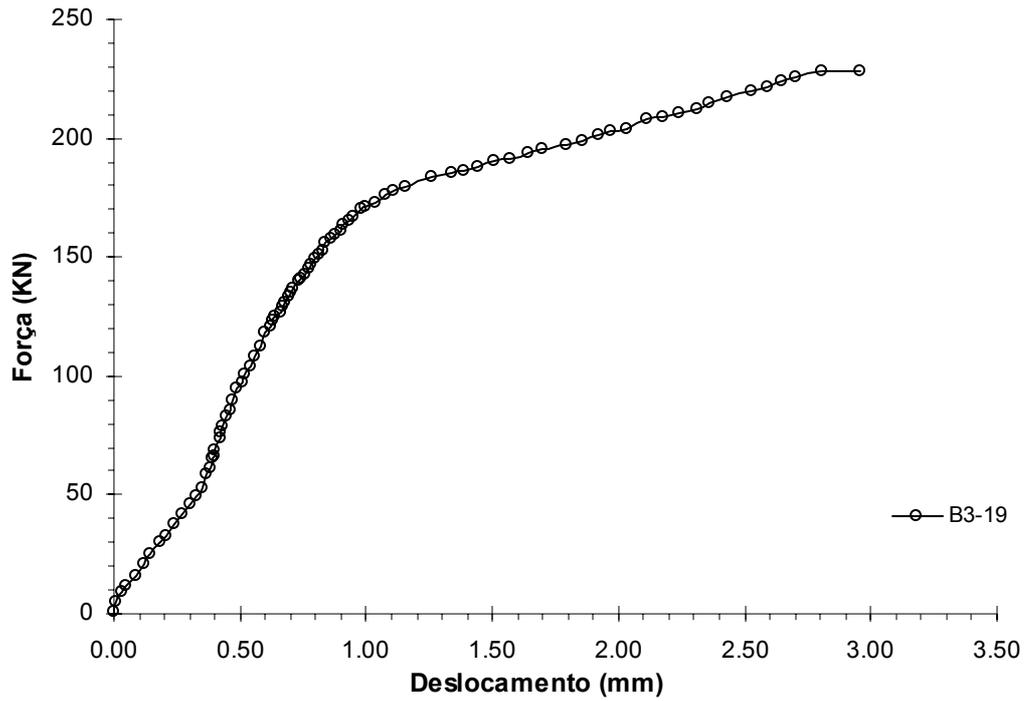


Figura 4.24 - Curva carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura, para placas de quatro pinos com armadura de suspensão.

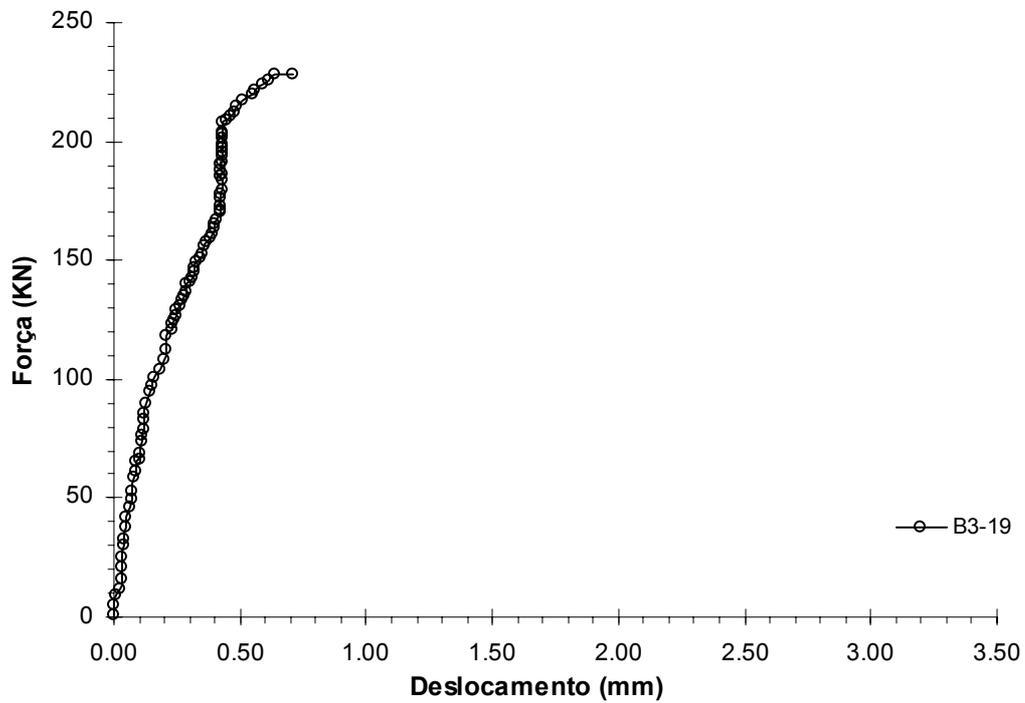


Figura 4.25 - Curva carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura, para placas de quatro pinos com armadura de suspensão.

4.2.8.

Duas placas de quatro pinos com distância de 325 mm de eixo a eixo

A Figura 4.26 mostra as curvas carga vs. deformação nos pinos para os três ensaios de duas placas de quatro pinos, com 325 mm de distância entre eixos.

A redução da capacidade de carga devido à sobreposição dos cones de ruptura foi de 16,85%.

Deve-se lembrar que nesta série de ensaios as deformações foram obtidas para cada placa e que o resultado mostrado na Figura 4.26 representa a média de quatro extensômetros, sendo dois em cada placa, instalados nos pinos diagonalmente opostos (confira Figura 3.14). As curvas carga vs. deformação para cada placa encontram-se no Apêndice 1.

A Figura 4.27 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura e a Figura 4.28 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura, para os três ensaios de placas de quatro pinos com distância de 325 mm de eixo a eixo. Nesta série de ensaios os deslocamentos foram obtidos para cada placa e os resultados mostrados nas Figuras 4.27 e 4.28 representam a média de dois transdutores de deslocamento para cada caso. Estes foram instalados em cada placa conforme mostrado na Seção 3.3.2. As curvas carga vs. deslocamento para cada placa encontram-se no Apêndice 1.

Nesta série de ensaios era inevitável que uma das placas rompesse primeiro que a outra. Após a realização do ensaio das duas placas, a placa remanescente era ensaiada.

A Figura 4.29 mostra as curvas carga vs. deformação nos pinos para os três ensaios das placas remanescente.

A Figura 4.30 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura e a Figura 4.31 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura para os três ensaios das placas remanescente.

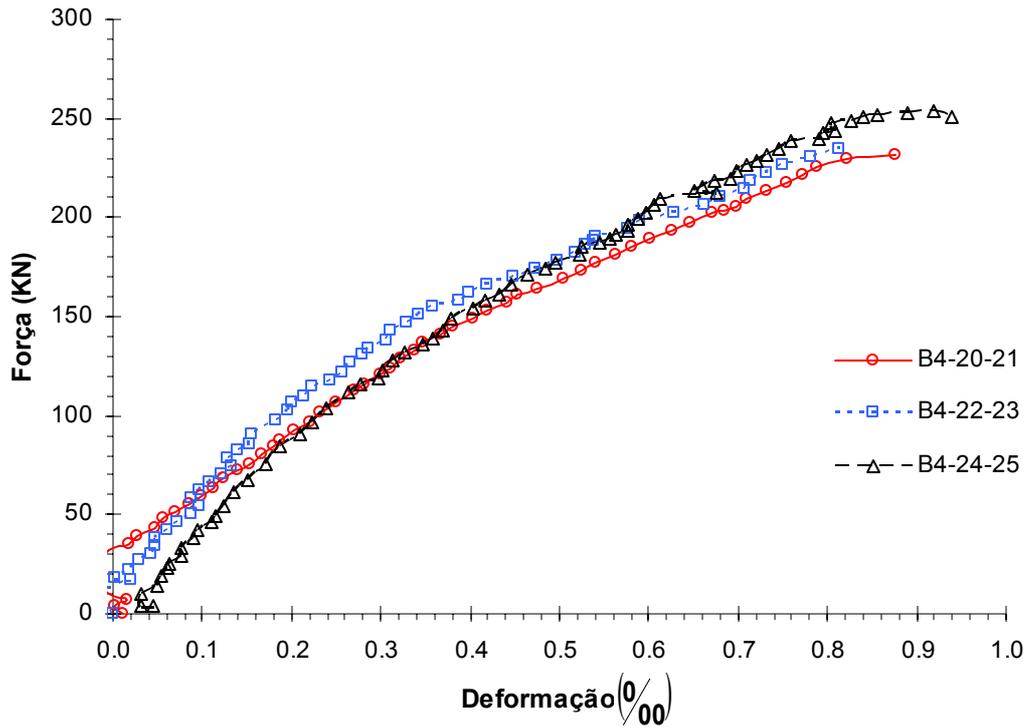


Figura 4.26 - Curvas carga vs. deformação no pino, para os três ensaios de placas de quatro pinos com distância de 325 mm de eixo a eixo.

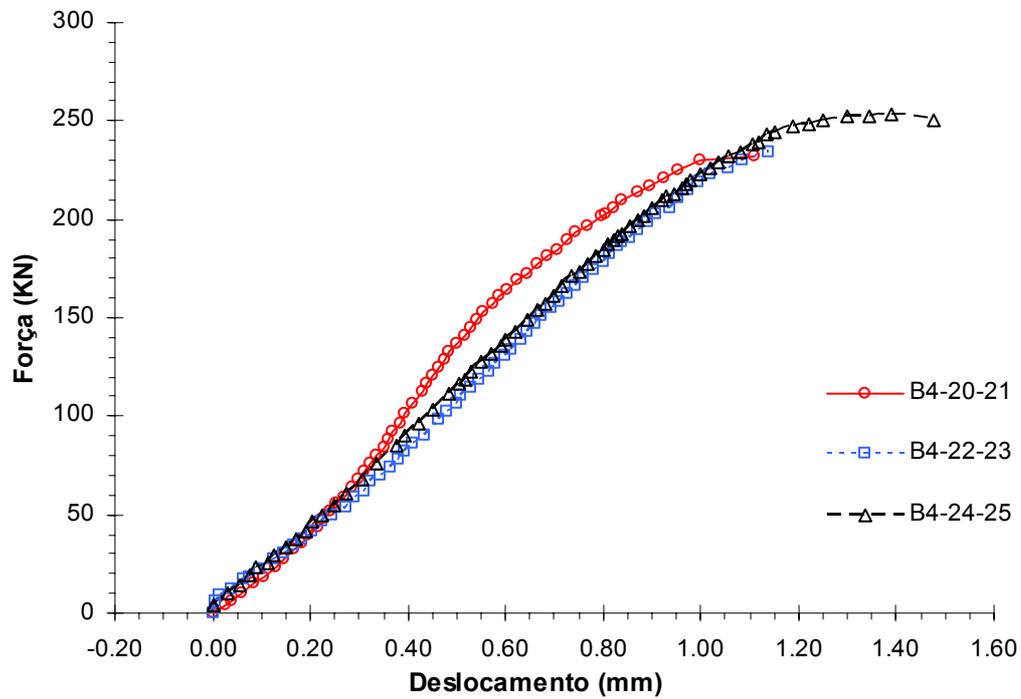


Figura 4.27 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura, para os três ensaios de placas de quatro pinos com distância de 325 mm de eixo a eixo.

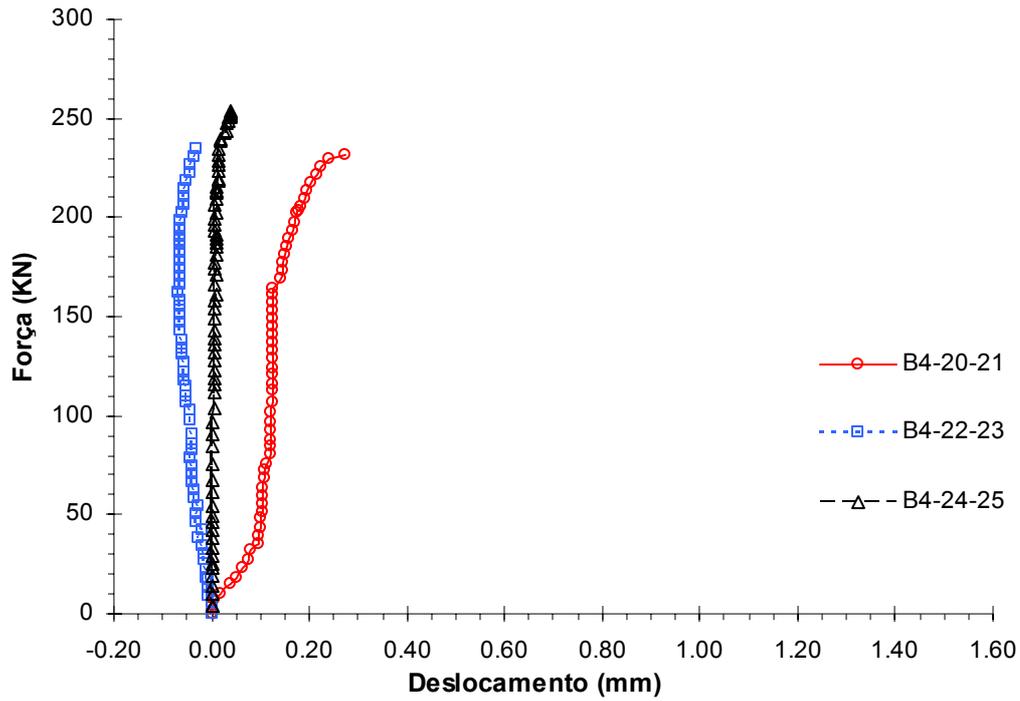


Figura 4.28 - Curvas carga vs. deslocamento das placas em relação ao cone de ruptura, para os três ensaios de placas de quatro pinos com distância de 325 mm de eixo a eixo.

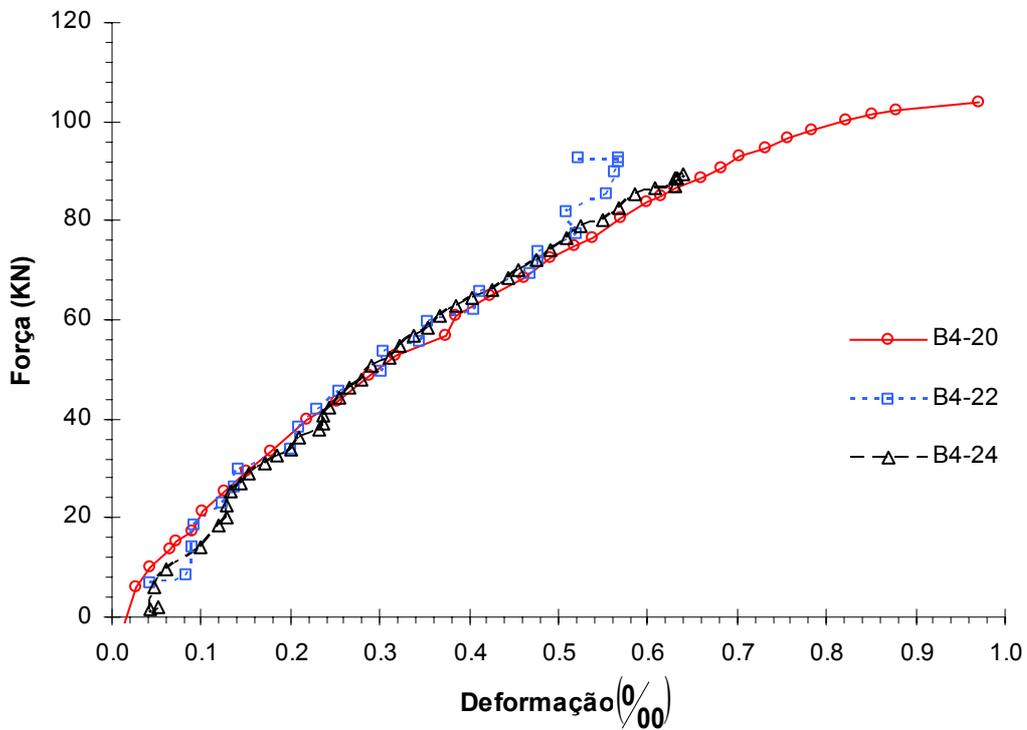


Figura 4.29 - Curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios das placas remanescentes.

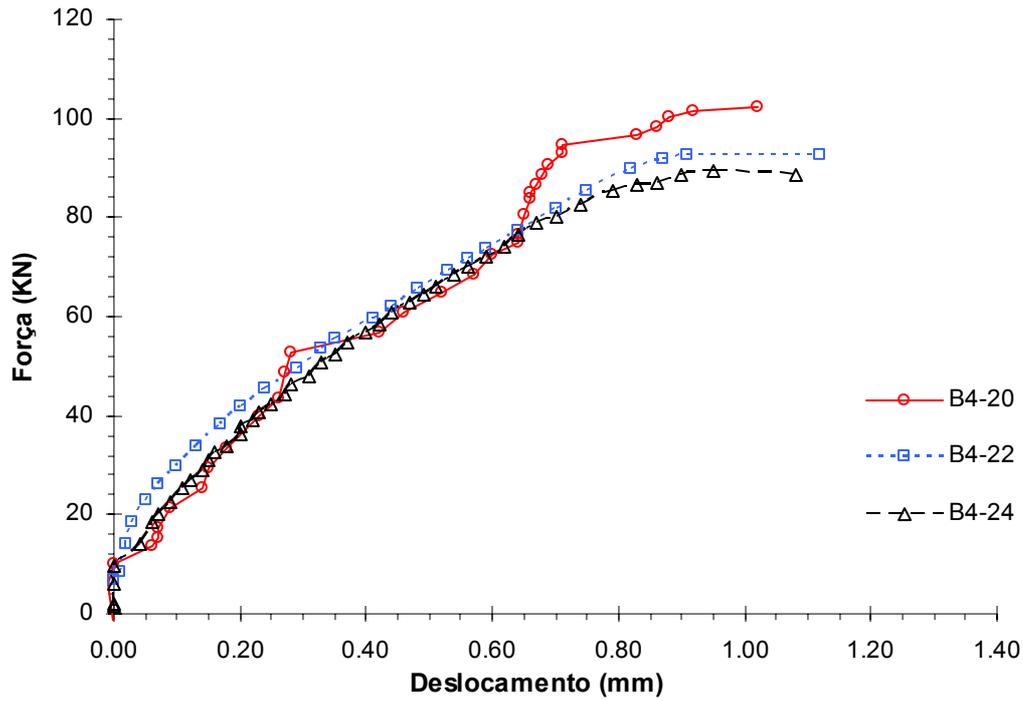


Figura 4.30 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura, para os três ensaios das placas remanescentes.

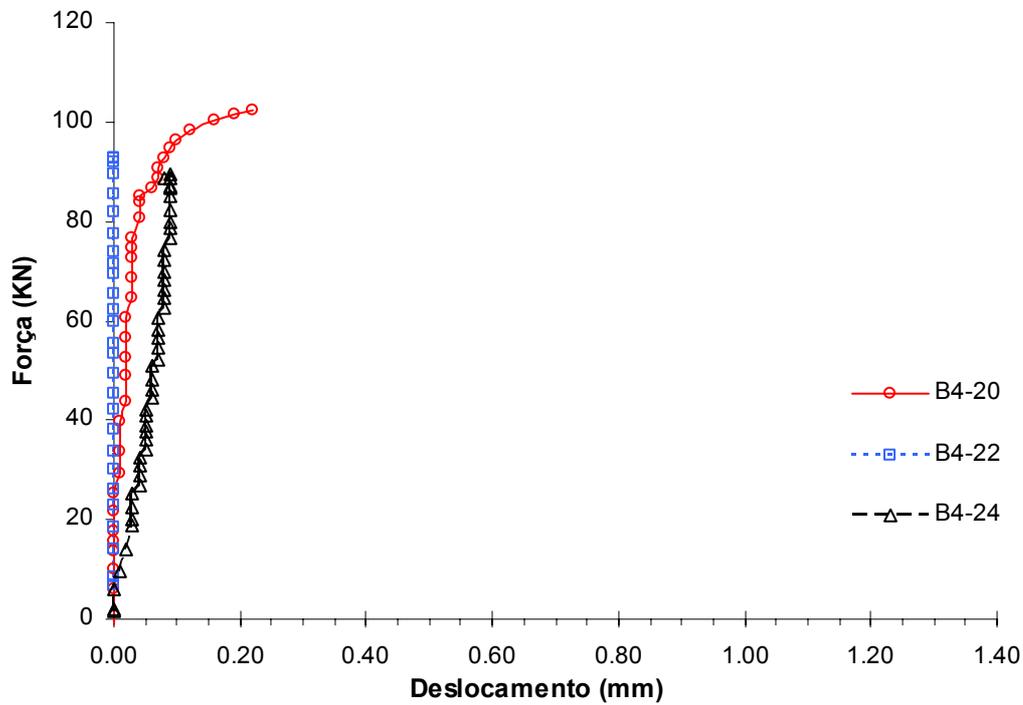


Figura 4.31 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura, para os três ensaios das placas remanescentes.

4.2.9.

Duas placas de quatro pinos com distância de 200 mm de eixo a eixo

A Figura 4.32 mostra as curvas carga vs. deformação nos pinos para os três ensaios de duas placas de quatro pinos associadas, com distância de 200 mm de eixo a eixo.

As deformações foram obtidas para cada placa e o resultado mostrado na Figura 4.32 representa a média de quatro extensômetros, sendo dois em cada placa, instalados nos pinos diagonalmente opostos. As curvas carga vs. deformação para cada placa encontram-se no Apêndice 1.

A Figura 4.33 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura e a Figura 4.34 mostra as curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura, para os três ensaios de placas de quatro pinos com distância de 200 mm de eixo a eixo.

As curvas carga vs. deslocamento para cada placa encontram-se no Apêndice 1.

A ruptura das placas com a distância de eixo a eixo de 200 mm ocorreu simultaneamente, formando um cone de ruptura único e a redução da carga de ruptura devido à sobreposição dos cones foi de 31,03%.

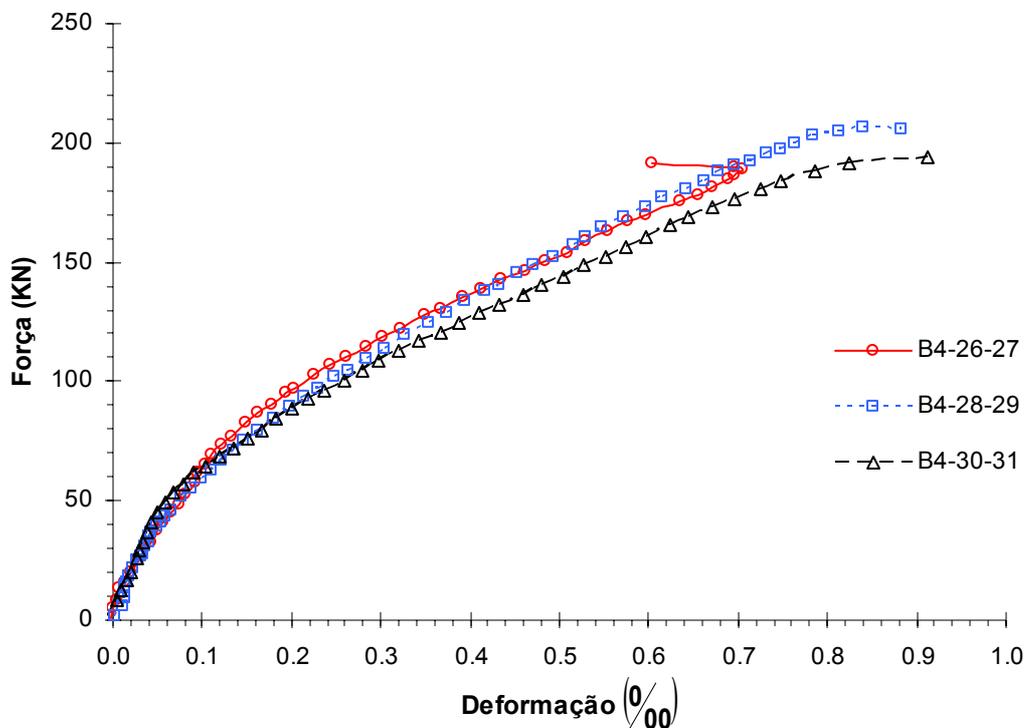


Figura 4.32 - Curvas carga vs. deformação no pino para os três ensaios de placas de quatro pinos com distância de 200 mm de eixo a eixo.

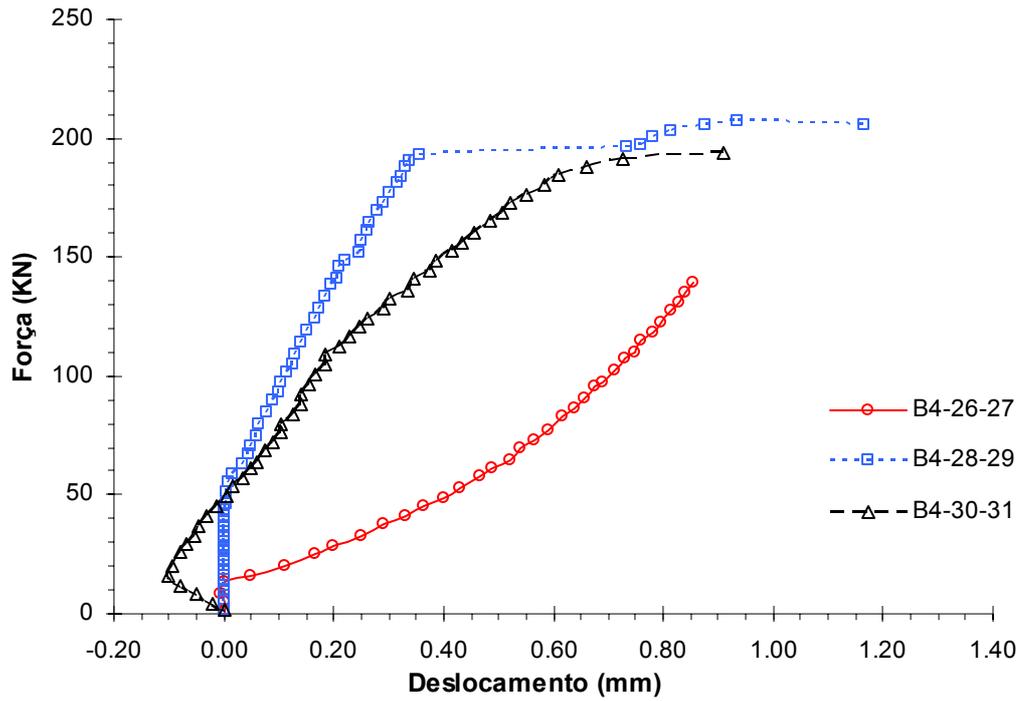


Figura 4.33 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação a um ponto fora do cone de ruptura, para os três ensaios de placas de quatro pinos com distância de 200 mm de eixo a eixo.

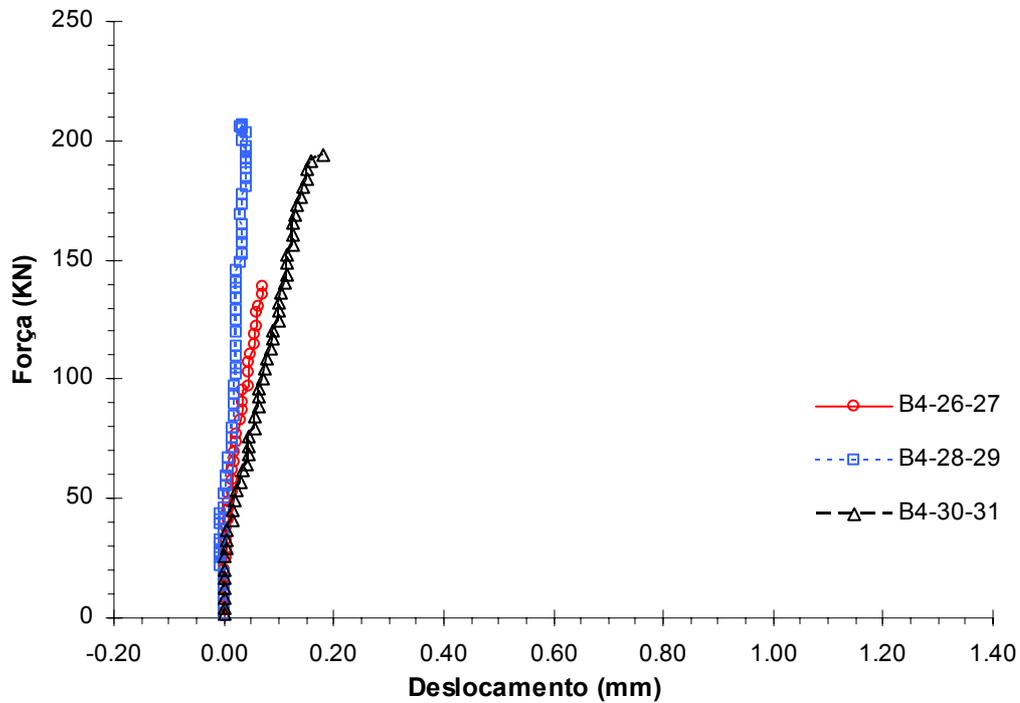


Figura 4.34 - Curvas carga vs. deslocamento da placa em relação ao cone de ruptura, para os três ensaios de placas de quatro pinos com distância de 200 mm de eixo a eixo.

4.3. Influência do bordo e do canto

A Figura 4.35 mostra as curvas carga normalizada vs. deformação em placas situadas em posições distintas. Nesta figura foram tomados os resultados de apenas uma placa de cada grupo: placa B1-06 representando os ensaios de placa de canto, placa B1-09 representando os ensaios de placas isoladas e a placa B2-15 representando placas de bordo. A Figura 4.36 mostra as curvas carga vs. deslocamento para as referidas posições de placas.

A normalização da carga aplicada no ensaio foi feita dividindo o valor da carga aplicada pela resistência à compressão do concreto na data de cada ensaio. Assim a unidade da carga normalizada será kN/MPa.

Na Figura 4.35 é apresentado um ensaio de placa de cada grupo. Na escolha destes ensaios buscaram-se os mais representativos. A obtenção da carga normalizada média é resumida na Tabela 4.5, considerando apenas placas onde não foram empregadas armaduras de suspensão.

Tabela 4.5 - Normalização da carga de ruptura para placas de pinos únicos, instaladas em pontos distintos.

Placa	f_c (MPa)	N_u (kN)	N_u^* (kN/MPa)	N_{u^*m} (kN/MPa)
Placa de canto				
B1-04	23,3	37,83	1,62	1,50
B1-05	23,2	30,88	1,33	
B1-06	23,0	35,53	1,54	
Placa de bordo				
B2-13	21,5	49,47	2,30	2,28
B2-14	22,4	55,19	2,46	
B2-15	22,4	46,23	2,06	
Placa isolada				
B1-07	23,6	92,53	3,92	3,88
B1-08	22,5	93,32	4,15	
B1-09	23,5	84,22	3,58	

Onde,

f_c Resistência à compressão do concreto.

N_u Carga de ruptura.

N_u^* Carga de ruptura normalizada.

N_{u^*m} Carga de ruptura normalizada média.

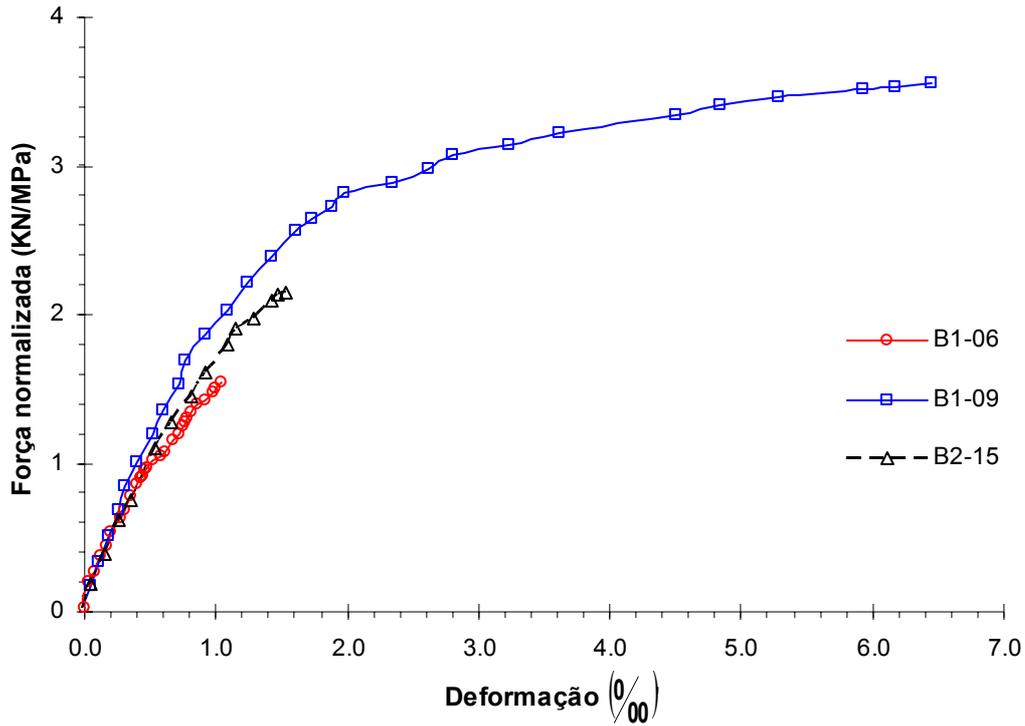


Figura 4.35 - Curvas carga vs. deformação de placas de pino único instaladas em três pontos distintos: B1-06 placa de canto, B1-09 placa isolada e B2-15 placa de bordo

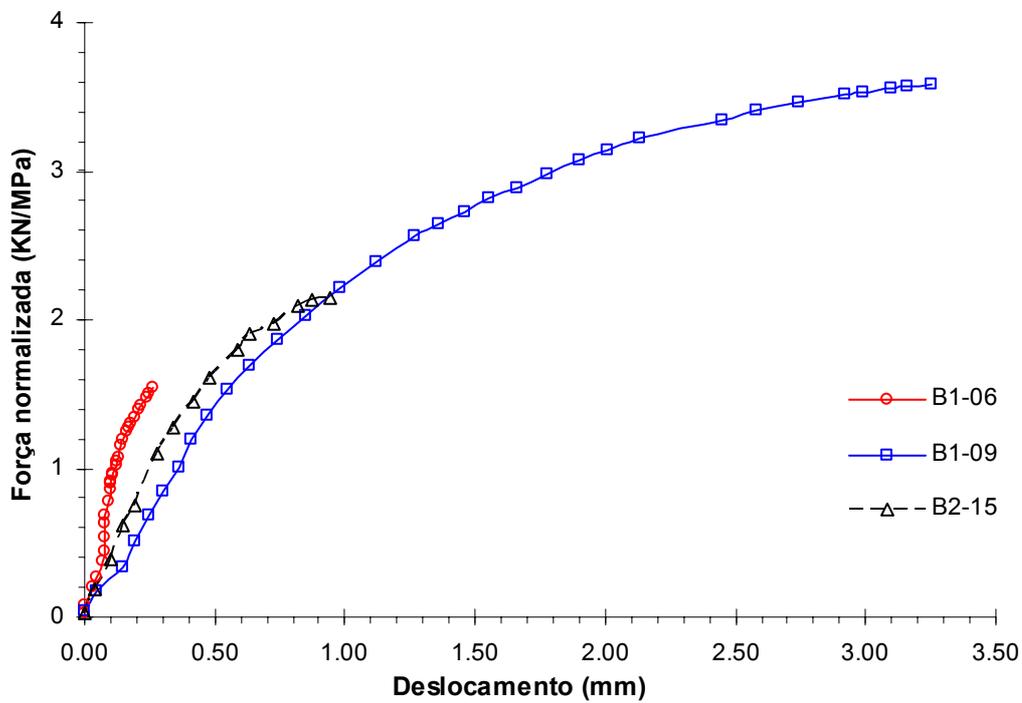


Figura 4.36 - Curvas carga vs. deslocamento de placas de pino único instaladas em três pontos distintos: B1-06 placa de canto, B1-09 placa isolada e B2-15 placa de bordo.

Na Tabela 4.5 encontra-se a influência da localização da placa de ancoragem no valor da carga de ruptura. A placa de bordo atingiu 0,59 da carga da placa isolada e a placa de canto atingiu 0,39 da carga de ruptura da placa isolada.

Considerando as deformações máximas no pino nas três séries de ensaios (mostrados na Tabela 4.4, referente aos resultados gerais) tem-se um valor em torno de 7‰ para placa isolada, 1,5‰ para placa de bordo e 0,9‰ para placa de canto. Os deslocamentos do cone de ruptura do concreto no momento da ruptura foram 3,88 mm para placa isolada, 0,98 mm para placa de bordo e 0,25 mm para placa de canto.

4.4. Eficiência da armadura de suspensão

As Figuras 4.37 e 4.39 mostram a comparação das curvas carga normalizada vs. deformação com o uso ou não da armadura de suspensão. As placas B1-06 e B2-15 representam os ensaios de placa de canto e placas de bordo respectivamente sem armadura de suspensão. As placas B1-01 e B2-10 representam os referidos ensaios com uso da armadura de suspensão. As curvas mostram que no caso de placa de canto com armadura de suspensão a deformação foi menor do que no caso sem armadura, já considerando a placa próxima de um bordo e placa de quatro pinos essa tendência foi invertida.

Na Tabela 4.6 encontra-se a influência da armadura de suspensão no valor da carga de ruptura. Nota-se que nos ensaios de placas de canto o uso da armadura de suspensão não se mostrou eficiência. É válido lembrar que foram realizados apenas dois ensaios em placas de canto para obtenção do valor médio da carga de ruptura o que tonou o resultado dos ensaios pouco conclusivos neste caso. Para o uso da armadura de suspensão em placas de bordo houve um acréscimo de 20% no valor médio da carga de ruptura normalizada.

As armaduras de suspensão se mostraram mais eficientes quando utilizadas em placas de quatro pinos, aumentando em 58,4% o valor médio da carga de ruptura normalizada (Tabela 4.6).

As Figuras 4.38 e 4.40 mostram a comparação das curvas carga normalizada vs. deslocamento com o uso ou não da armadura de suspensão. Lembrando que estes deslocamentos são do cone de concreto em relação a um ponto fora do cone. Como foi comentado em seções anteriores, o valor dos

deslocamentos para placas de canto foram influenciados pelo movimento de acomodação da placa, e assim dificultando a comparação do comportamento. Para a placa de bordo o deslocamento médio foi de 1,00 mm sem utilização da armadura e 1,45 mm quando a armadura de suspensão foi aplicada. Nas placas de quatro pinos o deslocamento médio na ruptura foi cerca de quatro vezes maior para a placa com armadura de suspensão (confira Tabela 4.4).

Tabela 4.6 - Normalização da carga de ruptura para placas com e sem armadura de suspensão.

Placa	f_c (MPa)	N_u (kN)	N_u^* (kN/MPa)	N_{u^*m}	(%)	
Placa de canto com armadura de suspensão						
B1-01	22,8	32,89	1,44	1,38	89,0	
B1-02	22,9	30,12	1,32			
Placa de canto sem armadura de suspensão						
B1-04	23,3	37,83	1,62	1,50		
B1-05	23,2	30,88	1,33			
B1-06	23	35,53	1,54			
Placa de bordo com armadura de suspensão						
B2-10	21,6	58,13	2,69	2,73	119,7	
B2-11	21,5	59,16	2,75			
B2-12	22,3	61,13	2,74			
Placa de bordo sem armadura de suspensão						
B2-13	21,5	49,47	2,30	2,28		
B2-14	22,4	55,19	2,46			
B2-15	22,4	46,23	2,06			
Placa de quatro pinos com armadura de suspensão						
B3-19	23,9	228,36	9,55	9,55	158,4	
Placa de quatro pinos sem armadura de suspensão						
B3-16	23,9	137,97	5,77	6,03		
B3-17	23,8	144,92	6,09			
B3-18	24	149,23	6,22			

Onde,

f_c Resistência à compressão do concreto.

N_u Carga de ruptura.

N_u^* Carga de ruptura normalizada.

N_{u^*m} Carga de ruptura normalizada média.

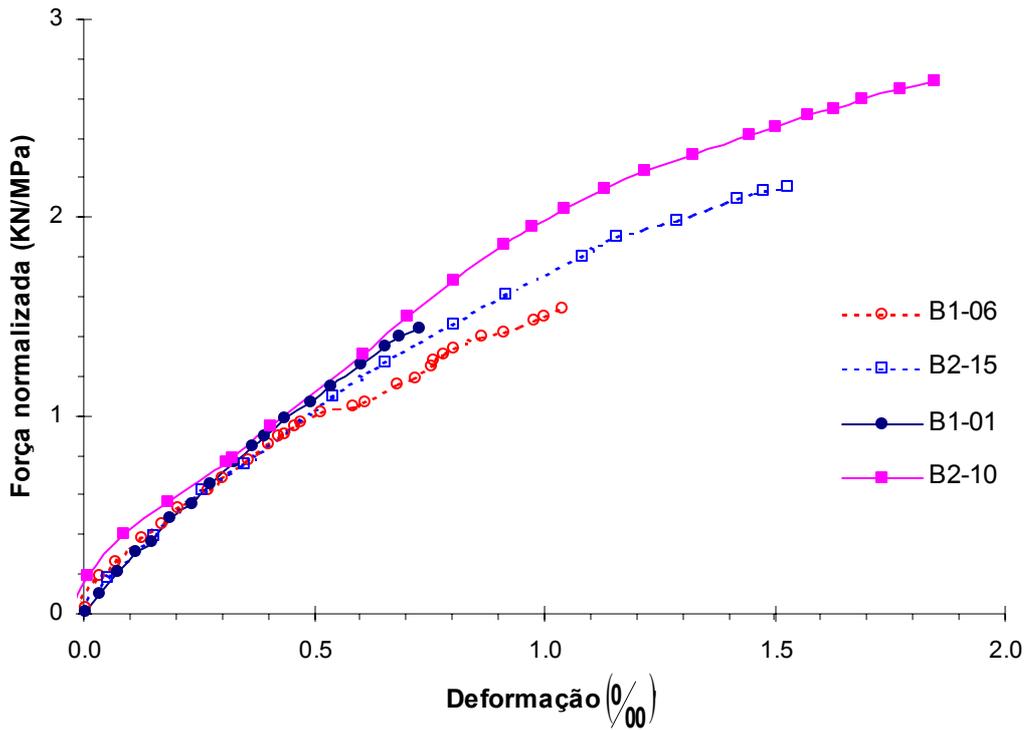


Figura 4.37 - Curvas carga vs. deformação de placas de pino único: B1-06 canto sem armadura; B2-15 bordo sem armadura; B1-01 canto com armadura; B2-10 bordo com armadura.

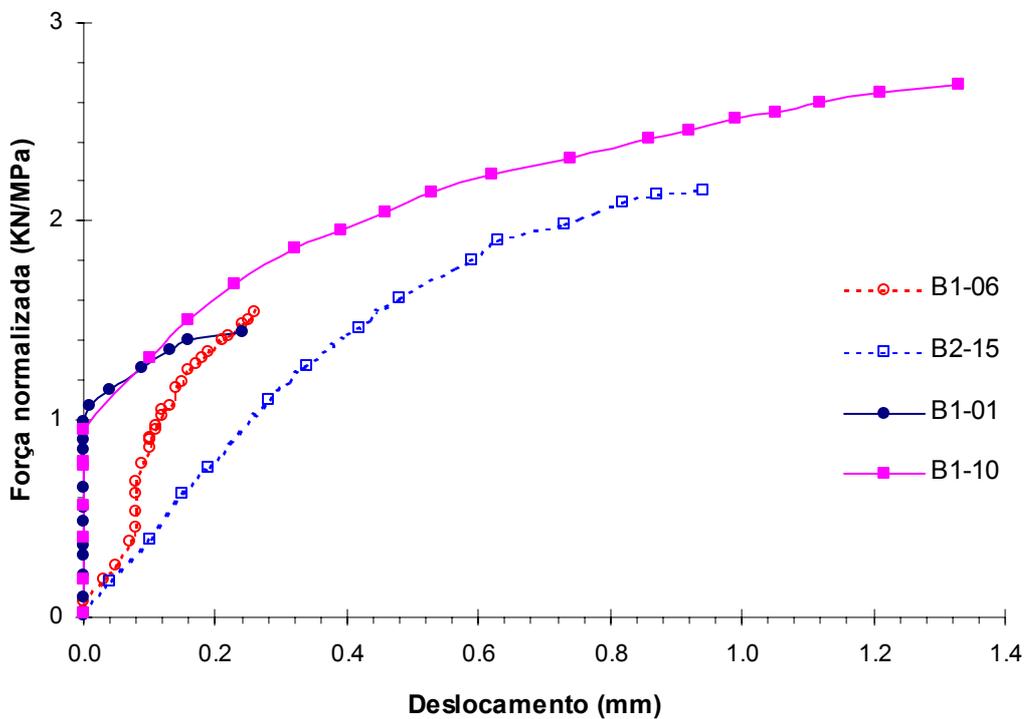


Figura 4.38 - Curvas carga vs. deslocamento de placas de pino único: B1-06 canto sem armadura; B2-15 bordo sem armadura; B1-01 canto com armadura; B2-10 bordo com armadura.

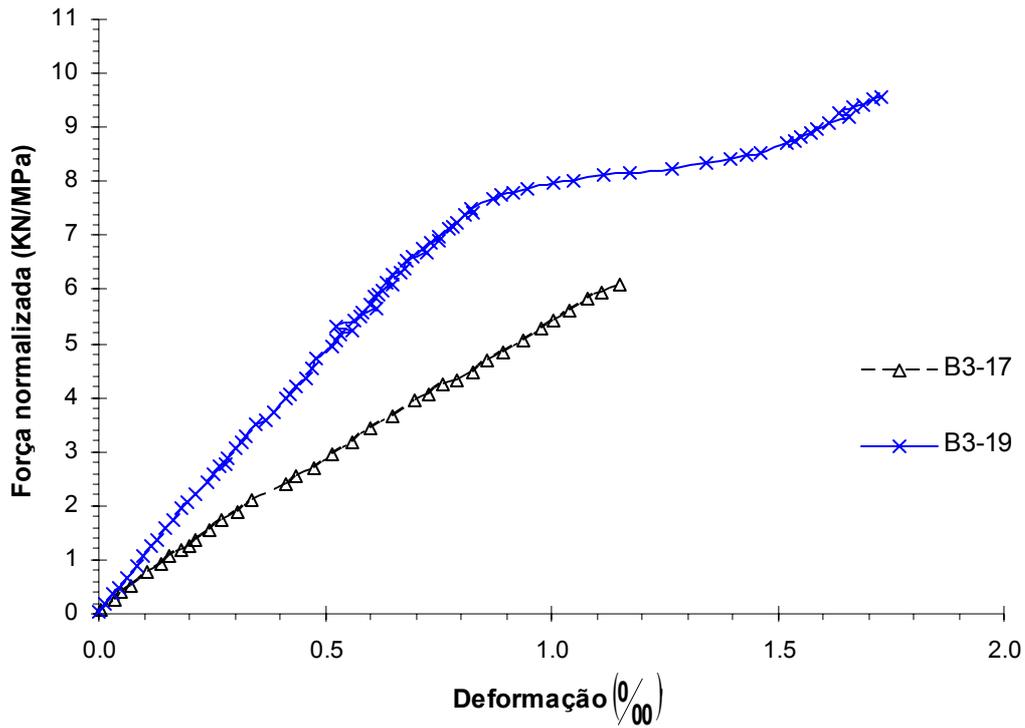


Figura 4.39 - Curvas carga vs. deformação de placas de quatro pinos: B3-17 sem armadura; B3-19 com armadura.

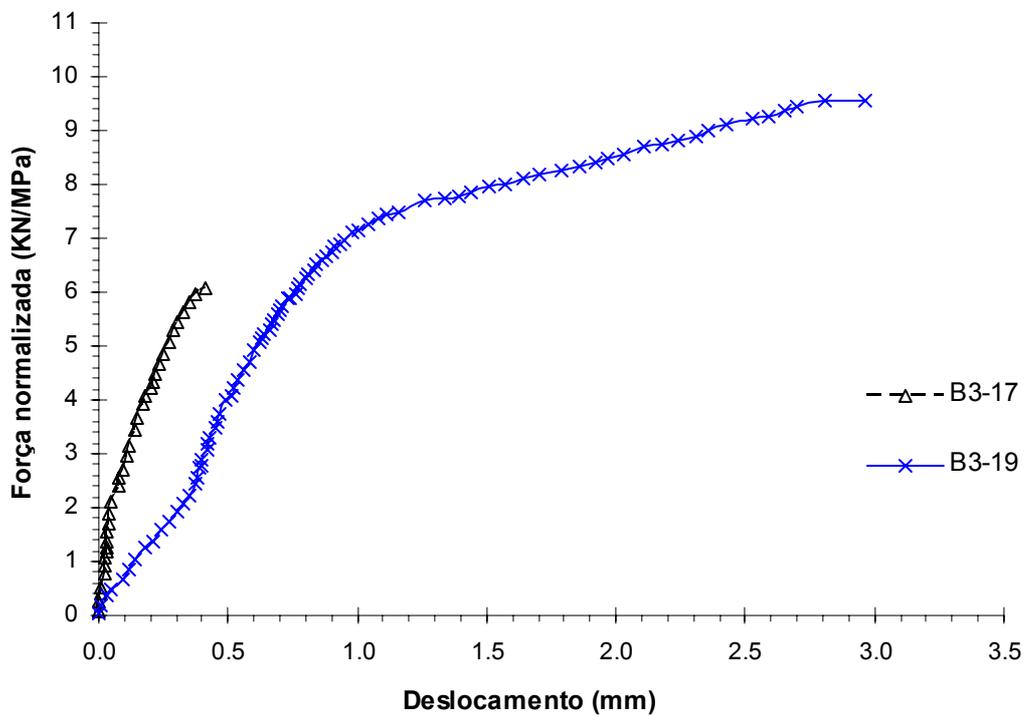


Figura 4.40 - Curvas carga vs. deslocamento de placas de quatro pinos: B3-17 sem armadura; B3-19 com armadura.

4.5. Área projetada na superfície do bloco

A área formada na superfície do bloco de concreto pelo cone de ruptura pode fornecer informações importantes a respeito do funcionamento do sistema de ancoragem. Um exemplo da importância da área projetada na superfície é que o método ψ adota o procedimento da relação de áreas (semelhante à área de superfície de falha definida pela NBR 2° Projeto 04:003.01-081 - (2002)) multiplicando a relação da área projetada atual (área líquida) pela área projetada da ancoragem isolada, ou seja, não limitada por influências de bordo (área total). Este procedimento baseia-se no princípio de que uma ancoragem próxima a um bordo tem a área projetada da pirâmide de tensão reduzida se esta pirâmide cruza o bordo da estrutura de concreto. Um ângulo de $\approx 35^\circ$, medido a partir de um plano perpendicular ao eixo do chumbador até a superfície de ruptura é adotado para inclinação da pirâmide de tensão. De forma semelhante, as ancoragens localizadas uma perto da outra têm as áreas projetadas de suas pirâmides de tensão reduzidas se a pirâmide de tensão de uma cruza a pirâmide de tensão da outra ancoragem. O procedimento para a obtenção destas áreas foi descrito na Seção 2.7.1, onde a Figura 2.20 mostra como é obtida a área projetada da ancoragem isolada e a Figura 2.21 mostra a redução da área devido ao agrupamento de pinos (Figura 2.21 (a)) e devido a proximidade de bordo (Figura 2.21 (b)).

Com base nas imagens digitalizadas dos blocos de concreto tiradas após a realização dos ensaios, onde era visível a superfície de ruptura, foi feita uma análise dos valores da área delineada pela ruptura do cone de concreto na superfície do bloco.

A metodologia adotada para obtenção das áreas de ruptura na superfície do bloco foi a seguinte:

As imagens digitalizadas foram importadas para software gráfico *AutoCad* e sobre as imagens foram desenhadas as superfícies correspondentes a superfície do bloco (A_b) e a área da superfície de ruptura projetada (A_p). A partir dos desenhos foi possível determinar os valores destas áreas, na imagem, utilizando uma ferramenta do *AutoCad*. A área real da superfície do bloco (A_r) era conhecida, então a área real da superfície de ruptura projetada (A_{rp}) foi obtida pela seguinte expressão:

$$A_{rp} = A_r \frac{A_p}{A_b} \quad (4.2)$$

Onde A_{rp} é a área real do cone de ruptura projetada na superfície do bloco, A_r é a área real da superfície do bloco, A_p é a área calculada na imagem do cone de ruptura projetada na superfície do bloco e A_b é área da superfície do bloco calculada na imagem.

Quando o efeito de perspectiva na imagem era muito acentuado, a porção da área real conhecida utilizada na comparação era escolhida próxima da área do cone que se pretendia medir. Esta precaução foi tomada para evitar que o efeito de perspectiva influenciasse o valor da área calculada.

A eficiência da metodologia foi aferida a partir de valores de área obtidos em moldes de papel retirados da área de superfície do cone de ruptura. As áreas obtidas nos moldes apresentaram valores da ordem de 99% quando comparadas com as medidas feitas a partir das imagens.

A Tabela 4.7 apresenta a comparação da área superficial experimental, obtidas a partir das imagens, com área superficial da projeção da pirâmide de tensão teórica de 35°. Na Tabela 4.7 não foram incluídos os ensaios de placas de quatro pinos isolada, que apresentaram uma superfície de ruptura muito irregular (Figura 4.41), e os ensaios de placas de quatro pinos com distância de 325 mm de eixo a eixo no qual a ruptura das duas placas não foi simultânea.



Figura 4.41 - Superfície de ruptura irregular do ensaio de placa de quatro pinos isolada.

A Figura 4.42 apresenta a metodologia utilizada no cálculo da área de superfície do cone de ruptura, mostrando as superfícies desenhadas que foram utilizadas no cálculo.

Tabela 4.7 - Comparação da área superficial experimental com área superficial da projeção da pirâmide de tensão de 35°.

Placa	A_{rp} (cm ²)	A35 (cm ²)	$A_{rp,m}$ (cm ²)	A35/ $A_{rp,m}$
Pino único de canto com armadura de suspensão				
B1-01	193	488	152	3,2
B1-02	112			
Placa de canto sem armadura de suspensão				
B1-04	360	488	359	1,2
B1-05	512			
B1-06	314			
Placa com pino único isolada				
B1-07	2712	1168	3020	0,4
B1-08	3199			
B1-09	3149			
Placa de bordo com armadura de suspensão				
B2-10	613	755	606	1,5
B2-11	681			
B2-12	525			
Placa de bordo sem armadura de suspensão				
B2-13	1091	755	773	1,0
B2-14	476			
B2-15	753			
Duas placas de quatro pinos com distância de 200 mm de eixo a eixo				
B4-26-27	1091	2834	3695	0,8
B4-28-29	476			
B4-31-31	753			

Onde,

A_{rp} Área de ruptura na superfície do bloco obtida experimentalmente.

A35 Área de ruptura na superfície do bloco da projeção da pirâmide de tensão de 35°.

$A_{rp,m}$ Média da área ruptura na superfície do bloco obtida experimentalmente.

Observando a Tabela 4.7 e a Figura 4.42 percebe-se que nos ensaios de placas de canto a área superficial foi menor quando havia armadura de suspensão do que quando a armadura não estava presente, indicando que a superfície de ruptura se formou evitando a armadura de suspensão. Por isso, nos casos de placa de canto, a presença da armadura de suspensão não elevou o valor da carga de ruptura, como visto anteriormente.

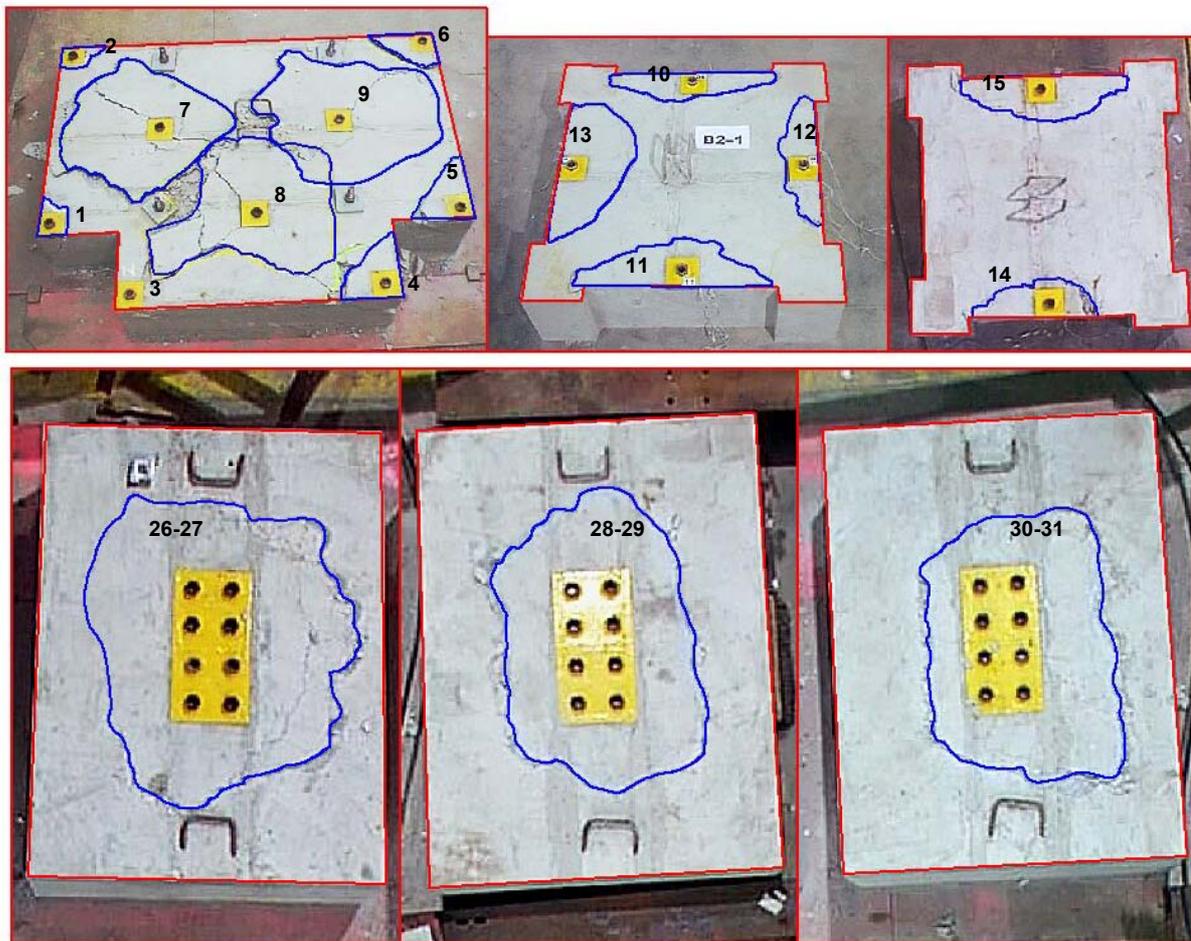


Figura 4.42 - Metodologia utilizada no cálculo para obtenção da área de superfície do cone de ruptura.

Nos casos de placas de pino único isolada e duas placas juntas o fator A_{35}/A_m inferior a um se deve provavelmente ao fato de que próximo da superfície de ruptura há um espalhamento do cone, o que aumenta a área na superfície obtida experimentalmente.

4.6. Comportamento do cone de ruptura

O ângulo do cone de ruptura, isto é, ângulo medido a partir de um plano perpendicular ao eixo do chumbador até superfície de ruptura do concreto variou muito nos ensaios. Com base nas imagens digitalizadas foi possível calcular um valor médio deste ângulo. A Figura 4.43 (a) mostra a ruptura das placas de canto com armadura e a Figura 4.43 (b) placas de canto sem armadura. Percebe-se que o uso da armadura aumentou o ângulo nesses casos. O valor do ângulo medido a partir de um plano perpendicular ao eixo do chumbador, obtido na face

do bloco, foi de 30° para a placa sem armadura de suspensão e 46° para placa sem armadura.

Considerando ensaios de placas de bordo o ângulo médio de ruptura, na face do bloco, ficou em torno de 31° considerando ou não a utilização da armadura de suspensão. A Figura 4.44 mostra a cone ruptura na face do bloco B2 para todos os ensaios de placa de bordo. Nestes ensaios quando é considerado o ângulo obtido num plano perpendicular a face, o valor obtido é um pouco maior, cerca de 40° .



Figura 4.43 - Ruptura em placas de canto.

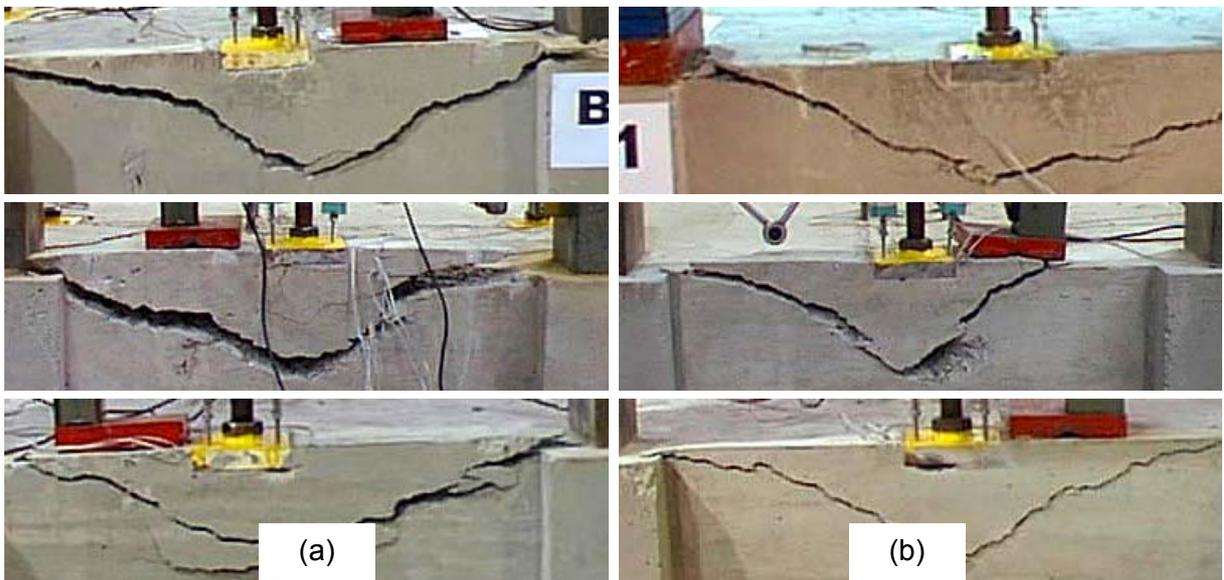


Figura 4.44 - Ruptura em placas de bordo.

Para os ensaios de placas com quatro pinos o valor do ângulo de ruptura fica em torno de 32° . É válido ressaltar que este valor é observado próximo da cabeça do pino, pois próximo da superfície do bloco ocorre o espalhamento da superfície de ruptura (Figura 4.45), tornando o ângulo de ruptura menor, principalmente nestes casos.

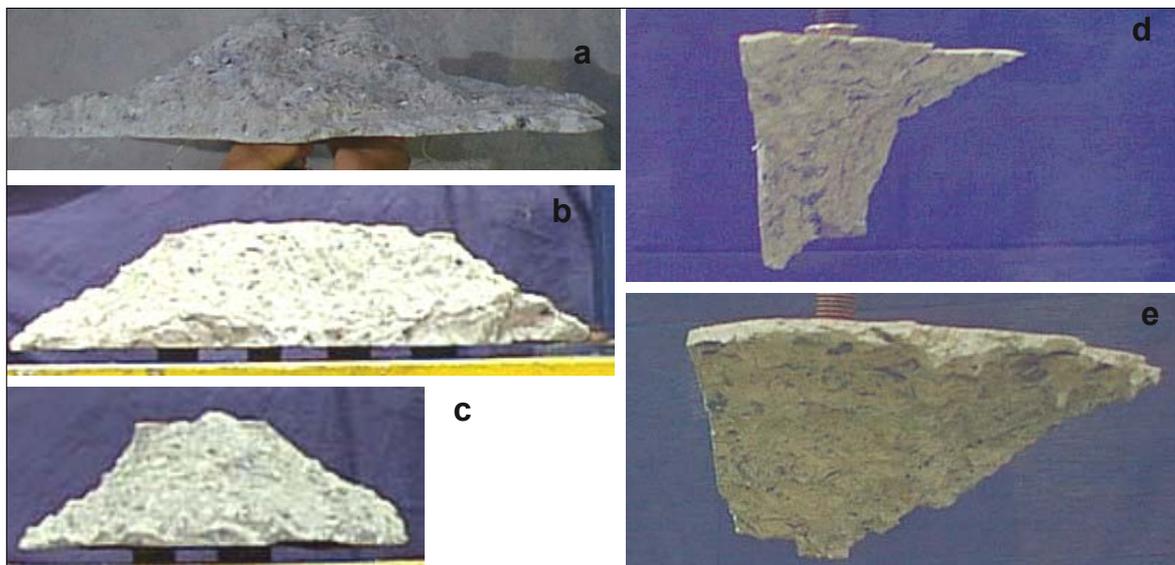


Figura 4.45 - Cones de ruptura: (a) placa de quatro pinos isolada, (b) e (c) duas placa de quatro pinos com distância de 200 mm de eixo a eixo, (d) placa de bordo com armadura de suspensão e (e) placa de bordo sem armadura de suspensão.

4.7. Comparação com métodos de cálculos

Nesta Seção é feita a comparação dos valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos pelas equações definidas na Seção 2.7 que tratou dos métodos de dimensionamento. Serão comparados apenas os ensaios onde não foram aplicadas as armaduras de suspensão.

Para minimizar o efeito da variação da resistência à compressão do concreto no valor da carga de ruptura obtida experimentalmente foi utilizada a carga de ruptura média normalizada para a comparação.

Os valores obtidos pelas equações foram normalizados assim: para cada valor de resistência à compressão do concreto correspondente a data do ensaio era calculada a carga de ruptura dividida por essa resistência e em seguida calculava-se a média correspondente a cada série de ensaio.

4.7.1.**Método de Eligehausen, Fuchs & Mayer (1987/1988) e Rehm et al. (1988) (método ψ)**

A Tabela 4.8 apresenta a comparação dos valores da carga normalizada obtidos nos ensaios com os valores da carga normalizada obtidas pela eq. (2.1) do método ψ .

De modo geral a comparação mostra uma boa aproximação entre os resultados teóricos do método ψ e experimentais. Por exemplo, o valor do fator $N_{u^*m}/N_{u^*\psi}$ obtido para placa de pino único isolado de 0,91 pode ser considerado uma boa aproximação, uma vez que, a variação dos valores obtidos experimentalmente para esta mesma série de ensaio variou em proporção semelhante. Os valores teóricos se aproximaram ainda mais dos resultados experimentais nos ensaios de placa de canto com o fator $N_{u^*m}/N_{u^*\psi}$ igual a 1,06 e nos ensaios de placa de bordo com este fator igual a 1,02.

Tabela 4.8 - Comparação dos valores da carga normalizada obtidos nos ensaios com os valores da carga normalizada obtidas pela eq. (2.1).

N_{u^*m} (kN/MPa)	$N_{u^*\psi}$ (kN/MPa)	$N_{u^*m}/N_{u^*\psi}$
Placa com pino único isolada		
3,88	4,29	0,91
Placa com pino único de canto		
1,50	1,41	1,06
Placa com pino único de bordo		
2,28	2,24	1,02
Placa quatro pinos isolada		
6,03	7,06	0,85
Duas placas de quatro pinos com distância de 325 mm de eixo a eixo		
9,90	10,85	0,91
Duas placas de quatro pinos com distância de 325 mm de eixo a eixo		
8,11	10,13	0,80

Onde,

N_{u^*m} Carga de ruptura normalizada obtida experimentalmente.

$N_{u^*\psi}$ Carga de ruptura normalizada obtida pela Eq 2.1 do método ψ .

4.7.2.

Método de Bode & Hanenkamp (1985) e Bode & Roik (1987)

A Tabela 4.9 apresenta a comparação dos valores da carga normalizada obtidos nos ensaios com os valores da carga normalizada obtidas pela eq. (2.15) do método de Bode & Hanenkamp (1985) e Bode & Roik (1987).

Para as placas isoladas tanto de pino único quanto de quatro pinos os resultados teóricos do método de Bode, Hanenkamp & Roik e experimentais mostraram-se praticamente iguais. O fator N_{u^*m}/N_{u^*BHR} obtido nestes casos mostra uma diferença de apenas 2% entre valores experimentais e teóricos.

Já os resultados obtidos nos ensaios de placa de pino único de canto e de bordo não se mostraram satisfatório, uma vez que o fator N_{u^*m}/N_{u^*BHR} mostra que o valor obtido experimentalmente superou em 79% o valor calculado para placa de canto e em 100% o valor calculado para placa de bordo. Entretanto estes valores apresentam uma certa coerência quando examinados junto com a Figura 2.21, que para o valor da relação c/h_{ef} (0,44) estudado, os pontos experimentais situam-se bem acima da curva teórica.

Tabela 4.9 - Comparação dos valores da carga normalizada obtida nos ensaios com os valores da carga normalizada obtidas pela eq. (2.14).

N_{u^*m} (kN/MPa)	N_{u^*BHR} (kN/MPa)	N_{u^*m}/N_{u^*BHR}
Placa com pino único isolada		
3,88	3,82	1,02
Placa com pino único de canto		
1,50	0,84	1,79
Placa com pino único de bordo		
2,28	1,14	2,00
Placa quatro pinos isolada		
6,03	6,24	0,97

Onde,

N_{u^*m} - Carga de ruptura normalizada obtida experimentalmente.

N_{u^*BHR} - Carga de ruptura normalizada obtida pela Eq 2.14 do método de Bode, Hanenkamp & Roik.

4.7.3.

Método do ACI 349(1985)

O valor carga de ruptura calculado pela eq. (2.17) foi 82,4 kN, equivalente a 91,5% do valor encontrado experimentalmente.