

4 Resultados e Análise Experimental

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados no laboratório da Pontifícia Universidade Católica – PUC e no laboratório da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, localizados no Rio de Janeiro, relativos as séries S2010 e S2014 dos ensaios de *pull out*, ensaios dos conectores, bem como os ensaios dos materiais empregados.

4.1. Ensaio de cisalhamento direto nos conectores

4.1.1. Ensaios com perna de solda conhecida

Os resultados obtidos para os ensaios do conjunto de perna solda de 5 mm estão representados nas Figura 4.1 a Figura 4.3. A Figura 4.1 apresenta o ensaio S5.1. No item (a) e (b) são apresentados os detalhes da montagem do ensaio. Os itens (c) e (d) mostram o detalhe do pino, e seu deslocamento, após a execução do ensaio, e o rompimento da solda. Com detalhe no item (e), pode-se observar que no centro da solda, após o ensaio, o material foi descolado junto ao conector e não permaneceu no perfil base.

A Figura 4.2 mostra o ensaio S5.2. No item (a) é apresentada a montagem do ensaio, observando-se que este ensaio foi realizado com as duas placas presas ao conector, para simular o efeito do concreto. Os itens (b) e (c) mostram os detalhes dos elementos após a ruptura, sendo em (b) possível verificar que o rompimento ocorreu no conector e não na solda, conforme item (c).

A Figura 4.3 apresenta o ensaio S5.3. No item (a) mostra-se a montagem do ensaio, também com a consideração das duas placas presas ao conector. Os itens (b) e (c) mostram os detalhes dos elementos após a ruptura, sendo em (b) é conector já solto da estrutura base, e o (c) detalhe da solda rompida, tendo sido esse elemento o responsável pelo rompimento. No item (d) é possível verificar que o conector tem em sua base a solda que descolou do perfil, devido a sua ruptura.



(a) Montagem – geral



(b) Montagem – detalhe



(c) Rompimento – detalhe pino



(d) Rompimento – detalhe pino



(e) Detalhe da solda rompida

Figura 4.1 – Ensaio S5.1.



(a) Montagem – geral



(b) Detalhe da região da solda



(c) Detalhe do conector rompido

Figura 4.2 – Ensaio S5.2.



(a) Montagem – geral



(b) Detalhe do conector rompido



(c) Detalhe da solda rompida



(d) Conector e solda aderida

Figura 4.3 – Ensaio S5.3.

A Figura 4.4 mostra o gráfico com os resultados obtidos para as soldas de 5 mm. Verifica-se que todos os ensaios realizados alcançaram valores últimos de força superiores ao previsto. Além disso, para os casos em que os conectores foram ensaiados com as duas placas que tinham a função de simular o confinamento do concreto, os valores obtidos foram superiores aos que não o tiveram, sendo o caso do ensaio S5.2, com confinamento e o S5.1, sem confinamento.

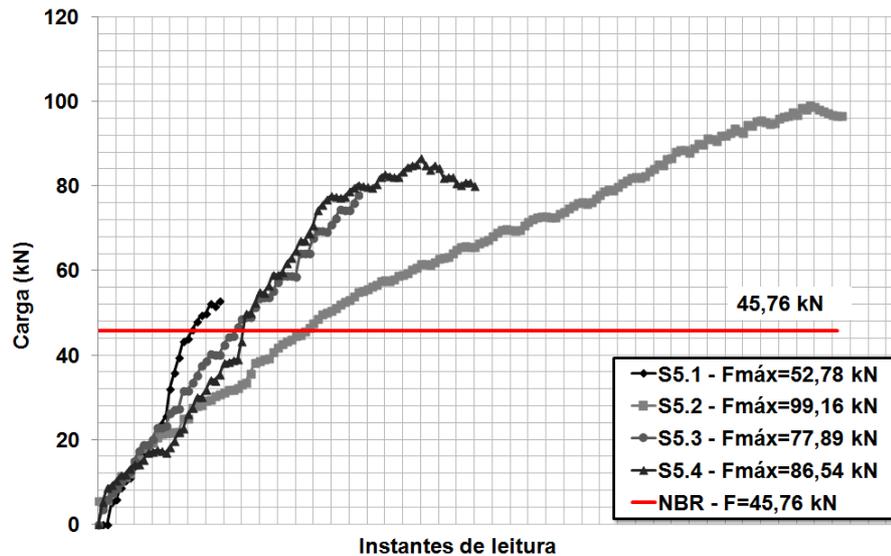


Figura 4.4 – Gráfico perna de solda de 5 mm.

Numericamente, a força média obtida para os ensaios com solda de 5 mm foi de 79,09 kN, 73% superior ao previsto pelos cálculos das Normas, conforme apresentado na Tabela 4.1. Transformando esse valor para tensão e deslocamento, seguindo o mesmo procedimento já apresentado neste relatório, obtêm-se os valores de 371,95 MPa e 20,10 mm, respectivamente, com os mesmos 73% a mais do valor esperado. Quanto ao tipo de ruptura, os ensaios S5.1, S5.3 e S5.4 ocorreram na solda, conforme esperado pelos cálculos. Ressalta-se que no rompimento do ensaio S5.1 fica evidente que a perna da solda não foi suficiente para a carga aplicada, tendo sua espessura descolada visualmente quando atingido a carga máxima. Para o ensaio S5.2 o conector que foi responsável pelo rompimento do sistema. Percebe-se que a camada de solda realizada para esse ensaio estava levemente superior aos demais, o que pode ter ajudado a essa forma de rompimento.

Tabela 4.1 – Resultados para a solda de perna de 5 mm.

Ensaio	F _{obt} (kN)	Falha	Falha prevista		F _{med} (kN)	τ _{obt} (MPa)	δ _{obt} (mm)	
			NBR	EC4				
S5.1	52,78	Solda	Solda	Conector	79,09	371,95	20,10	
S5.2	99,16	Conector						
S5.3	77,89	Solda						
S5.4	86,54	Solda						
Ensaio	F _{prev} (kN)		F _{med} F _{prev}		τ _{obt} τ _{prev}		δ _{obt} δ _{prev}	
	NBR	EC4	NBR	EC4	NBR	EC4	NBR	EC4
S5.X	45,76	62,09	1,73	1,27	1,73	1,27	1,73	1,27

Os resultados obtidos para os ensaios com solda de 8 mm são apresentados nas Figura 4.5 a Figura 4.8. A Figura 4.5 apresenta o ensaio S8.1. O item (a) traz a configuração do sistema, que teve a utilização apenas da placa soldada na chapa. O item (b) apresenta o detalhe do conector rompido. Nesse caso, o deslocamento do conector sobre a chapa não influenciou no resultado final do ensaio.



(a) Montagem – geral



(b) Detalhe do sistema



(c) Detalhe do conector e seu rompimento

Figura 4.5 – Ensaio S8.1.

A Figura 4.6 mostra o ensaio S8.2. Este ensaio foi realizado de duas formas: inicialmente foi considerado apenas o apoio do conector sobre a chapa soldada a placa de aplicação de força, porém antes de atingir o rompimento do sistema ocorreu o deslizamento da placa. Dessa forma, optou-se por retornar o sistema a situação inicial e incluir as duas placas no conector, simulando-se assim o confinamento do elemento. Como o conector já havia atingido deformação específica devido ao primeiro ciclo de carga, sua carga última não conseguiu atingir ao previsto teoricamente, porém através deste ensaio foi possível verificar a necessidade de se realizar os demais ensaios com as duas placas fixadas sobre o conector, principalmente para os casos com pernas maiores de solda, a fim de evitar o deslizamento observado. Sendo assim, o item (a) apresenta a primeira configuração realizada, com a utilização de uma placa, o item (b), com a segunda montagem, já sendo possível observar a inclusão da segunda placa de fixação do conector; e o item (c), o detalhe do conector rompido, responsável pelo fim do ensaio.



(a) Montagem – geral – 1^o
configuração



(b) Montagem – geral - 2^o
configuração



(c) Detalhe do conector rompido

Figura 4.6 – Ensaio S8.2.

A Figura 4.7 apresenta o ensaio S8.3. O item (a) apresenta a montagem do sistema e o item (b) a estrutura após o rompimento e a retirada da chapa

superior sobre o conector. Pode-se observar que o conector, mais uma vez, foi o responsável por atingir o rompimento do conjunto.



(a) Montagem – geral



(b) Detalhe do conector

Figura 4.7 – Ensaio S8.3.

A Figura 4.8 mostra o ensaio S8.4. O item (a) traz a montagem do sistema e o item (b) a estrutura após o rompimento, com detalhe na solda, possibilitando verificar que o rompimento não ocorreu nesse elemento e sim no conector.



(a) Montagem – geral



(b) Detalhe do conector

Figura 4.8 – Ensaio S8.4.

A Figura 4.9 mostra o gráfico com os resultados da solda de 8 mm e o respectivo valor teórico. Verifica-se que o único ensaio que não atingiu valores superiores ao esperado foi o S8.2. Isso se deve ao fato do escorregamento do

sistema, e posterior rompimento do conector, porque esse elemento estava apenas apoiado sobre uma das placas fixadas na chapa de aplicação de força, como pode ser observado nas fotos da Figura 4.6.

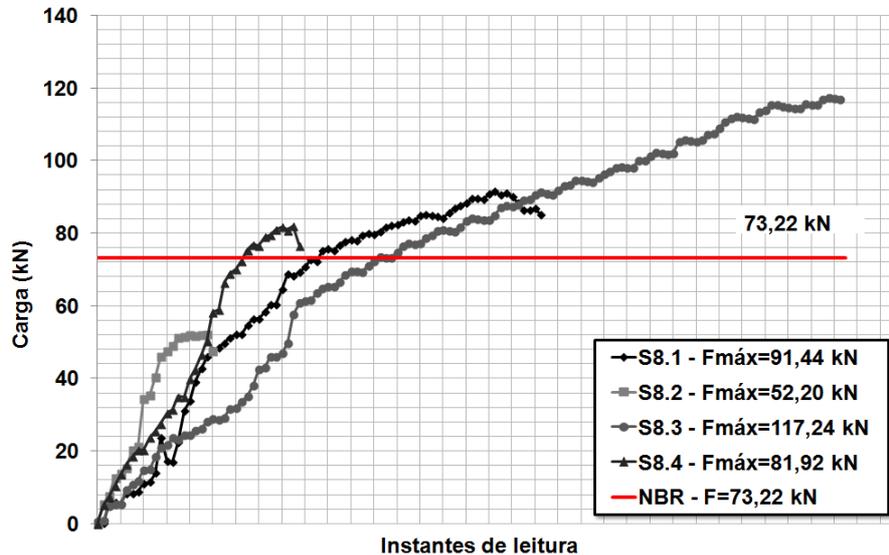


Figura 4.9 – Gráfico perna de solda de 8 mm.

Numericamente, a força média obtida para os ensaios com solda de 8 mm foi de 85,70 kN, 17% superior ao previsto pelos cálculos das Normas, e que teve seu valor reduzido devido ao ensaio S8.2. Transformando esse valor para tensão e deslocamento, obtêm-se os valores de 403,01 MPa e 21,78 mm, respectivamente. Comparando-se aos valores teóricos para essa solda, que correspondem a 344,33 MPa e 18,61 mm, pode-se novamente verificar uma superioridade de 17% dos valores obtidos. Quanto ao tipo de ruptura, todos os ensaios tiveram seu rompimento devido ao conector, diferente do previsto pelos cálculos que correspondia a solda, indicando que o processo da solda foi bem executado e que poderia ser considerado maiores limites para o sistema, do que o previsto. Esses valores são apresentados na Tabela 4.2.

A Figura 4.10 mostra o ensaio S10.3. No item (a) observa-se o sistema montado. No item (b), tem-se o detalhe do sistema rompido, sendo possível observar que o rompimento ocorreu no conector, e a solda sobre o perfil encontra-se sem alterações. O item (c) detalha o conector rompido.

Tabela 4.2 – Resultados para a solda de perna de 8 mm.

Ensaio	F _{obt} (kN)	Falha	Falha prevista		F _{med} (kN)	τ _{obt} (MPa)	δ _{obt} (mm)	
			NBR	EC4				
S8.1	91,44	Conector	Solda	Solda	85,70	403,01	21,78	
S8.2	52,20	Conector						
S8.3	117,24	Conector						
S8.4	81,92	Conector						
Ensaio	F _{prev} (kN)		F _{med} F _{prev}		τ _{obt} τ _{prev}		δ _{obt} δ _{prev}	
	NBR	EC4	NBR	EC4	NBR	EC4	NBR	EC4
	S8.X	73,22	75,31	1,17	1,14	1,17	1,14	1,17



(a) Montagem – geral



(b) Elementos rompidos



(c) Detalhe do conector rompido

Figura 4.10 – Ensaio S10.3.

A Figura 4.11 apresenta o ensaio S10.4. No item (a) observa-se o sistema montado. No item (b), tem-se o detalhe do sistema rompido e a solda sem alterações após a execução do ensaio. No item (c) o detalhe do conjunto conector e chapas de fixação e o item (d) o conector, podendo-se verificar que o ruptura do sistema ocorreu nesse elemento.

A Figura 4.12 apresenta o gráfico com os resultados obtidos para os conectores ensaiados com solda de perna de 10 mm, e o respectivo valor teórico.



(a) Montagem – geral



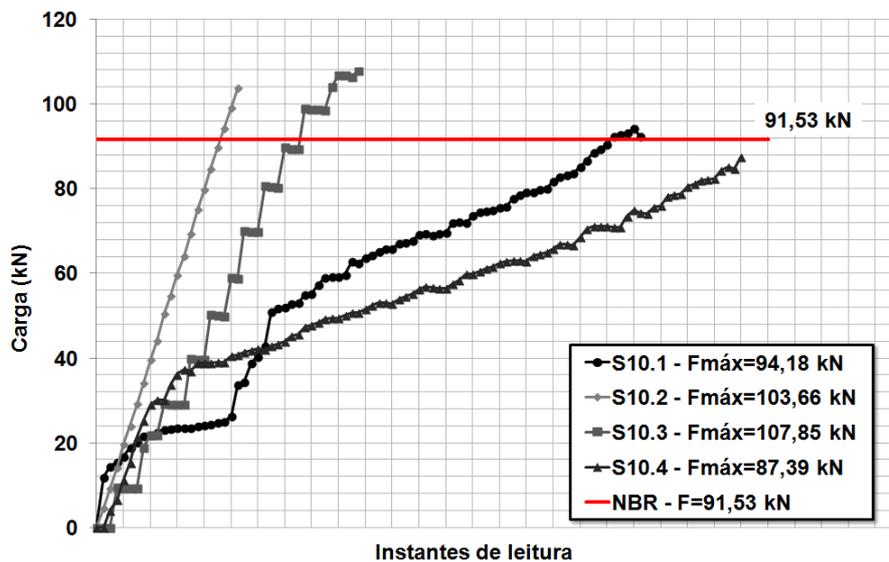
(b) Elementos rompidos



(c) Detalhe do conector



(d) Conector rompido

Figura 4.11 – Ensaio S10.4.**Figura 4.12 – Gráfico perna de solda de 10mm.**

Numericamente, a força média obtida para os ensaios com solda de 10 mm foi de 98,27 kN, 30% superior ao previsto pelos cálculos das normas. Considerando-se os valores para tensão e deslocamento obteve-se 462,13 MPa

e 24,98 mm, respectivamente, conforme pode-se observar na Tabela 4.3. Comparando-se aos valores teóricos para essa solda, que correspondem a 354,13 MPa e 19,64 mm (EC4), pode-se novamente verificar uma superioridade de 30% dos valores obtidos. Verificam-se ainda que todos os valores foram superiores ao esperado teoricamente e os rompimentos dos ensaios ocorreram devido ao conector, conforme calculado.

Tabela 4.3 – Resultados para a solda de 10 mm.

Ensaio	F _{obt} (kN)	Falha	Falha prevista		F _{med} (kN)	τ _{obt} (MPa)	δ _{obt} (mm)	
			NBR	EC4				
S10.1	94,18	Conector	Solda	Solda	98,27	462,13	24,98	
S10.2	103,66	Conector						
S10.3	107,85	Conector						
S10.4	87,39	Conector						
Ensaio	F _{prev} (kN)		F _{med} F _{prev}		τ _{obt} τ _{prev}		δ _{obt} δ _{prev}	
	NBR	EC4	NBR	EC4	NBR	EC4	NBR	EC4
S10.X	91,53	75,31	1,07	1,30	1,07	1,30	1,07	1,30

Observa-se que para todos os casos os valores obtidos foram superiores aos previstos, exceto para S8.2. Isso ocorreu devido ao escorregamento do sistema e posterior rompimento do conector, que estava apenas apoiado sobre uma das placas fixadas na chapa de aplicação de carga. Comparando-se os valores ao previsto, observa-se que os valores alcançados para as pernas de 5, 8 e 10 mm de solda foram superiores 73%, 17% e 7%, respectivamente, mesmo considerando-se os valores distintos nas séries, como o caso do S8.2 e S5.1. Quanto ao tipo de ruptura, as séries S8.X e S10.X romperam em sua totalidade devido ao conector, sendo esperado que ocorresse na solda, indicando a possibilidade de se considerar valores superiores de resistência para o conjunto. Para os ensaios S5.X, o S5.2 e S5.4 romperam no conector, também diferente do previsto. Pode-se observar que em S5.2 a camada de solda estava levemente superior aos demais, o que pode ter ajudado na mudança do tipo de colapso.

Com os resultados obtidos nesses ensaios, foi possível verificar que a execução das soldas com as pernas estudadas, suportariam as solicitações verificadas nos três primeiros ensaios realizados. A perna que mais se aproxima

dos valores usualmente realizados, 8 mm, obteve bons resultados quando comparados ao teórico, o que reforça tal afirmação. Comparando-se esses valores aos obtidos nos sistemas ensaiados, tem-se o descrito na Tabela 4.4. Utilizando-se como referência o ensaio com seis pinos, que atingiu o rompimento em 263,74 kN, caso os conectores tivessem seguido os mesmos padrões dos ensaiados, alcançaria uma resistência mínima de 514,2 kN, considerando-se apenas a comparação de resistência dos conectores. Esse valor seria superior ao obtido em 51,3%. Ressalta-se que o valor da solda S8 obteve um redução devido ao ensaio S8.2, e o estudo do confinamento para simular o concreto. Desconsiderando-se esse resultado, obtém-se um valor de carga média próximo ao que poderia ter ocorrido no ensaio PO.91, de 96,87 kN.

Fazendo-se a mesma comparação entre os valores, agora com a solda de 10 mm e os ensaios S10, são obtidos os resultados da Tabela 4.5. Nesse caso, as diferenças encontradas são ainda maiores.

Tabela 4.4 – Comparação dos resultados com os ensaios realizados – S8.

Ensaio Principal	F _{máx} (kN)	Número de conectores	F/ conector (kN)	F _{S8}	POxx/ S8
PO.2.1	263,74	6	43,33	85,70	50,6%
PO.9.1	389,50	4	97,38	85,70	113,6%
PO.9.3	317,54	4	79,38	85,70	92,6%

Tabela 4.5 – Comparação dos resultados com os ensaios realizados – S10.

Ensaio Principal	F _{máx} (kN)	Número de conectores	F/ conector (kN)	F _{S10}	POxx/ S10
PO.21	263,74	6	43,33	98,27	44,1%
PO.91	389,50	4	97,38	98,27	99,1%
PO.93	317,54	4	79,38	98,27	80,8%

Percebe-se que para os casos dos ensaios principais executados, os valores máximos obtidos estão abaixo da carga média alcançada pelos ensaios dos conectores. Sendo assim, pode-se apontar que a solda necessária, considerando-se os ensaios já realizados, deveria ser em torno de 10 mm de perna, quando utilizado como base os ensaios executados.

Com uma análise geral, considerando-se as cargas previstas para cada série de ensaios a serem realizados, e a solicitação dos ensaios principais, segue a Tabela 4.6. Nota-se que, apesar da carga de ruptura atingida pela solda S10 ser superior ao previsto teoricamente, essa não conseguiria alcançar as cargas previstas por conector para cada série de ensaios, havendo diferenças na ordem de 21% superior. Ressalta-se que essa comparação não considera os demais elementos envolvidos.

Tabela 4.6 – Resultados esperados e obtidos com a S10.

Ensaio Principal	F _{máx} (kN)	Número de conectores	F/ conector (kN)	F _{S10}	PO _{xx} / S10
PO.1X	402,1	4	100,53	98,27	102,3%
PO.2X	713,4	6	118,91	98,27	121,0%
PO.8X	475,6	4	118,91	98,27	121,0%
PO.9X	475,6	4	118,91	98,27	121,0%

Com as comparações realizadas, observa-se que nos casos dos ensaios executados a solda do conector indica que não estava dentro dos padrões necessários para suportar as cargas atuantes, e dessa forma ocorreu seu rompimento. Para esses resultados obtidos, a solda executada com profissional qualificado, e com 10 mm, teria suportado adequadamente à solicitação, e caso ocorresse o rompimento nesse elemento seria no conector e não na solda. Para o sistema geral, a avaliação também deveria contar com os demais elementos, pois a consideração apenas dos conectores levaria ao rompimento.

Nota-se assim, que é possível ter ocorrido problemas de soldagem dos elementos dos ensaios principais. Com o estudo dos conectores foi possível confirmar a necessidade de modificação dos ensaios, para que esta componente não recebesse a carga aplicada no sistema. Dessa forma, a força foi direcionada as barras de armadura e os ensaios modificados, conforme descrito.

4.1.2.

Ensaio de cisalhamento direto dos conectores da Série S2014

Com o objetivo de estudar e verificar as soldas dos conectores realizados para os ensaios da Série S2014, foi executada uma nova série de ensaios dos conectores utilizando-se para isso os conectores dos ensaios modificados, que devido a alteração proposta, não tiveram a influência das cargas durante a

execução dos testes. Dessa forma, foi possível estimar a perna real das soldas, por meio da comparação com o obtido nos ensaios realizados com perna conhecida, e confirmar a possível falha apresentada.

Para o estudo, foram analisados os conectores dos ensaios PO.22, PO.11 e PO.12, totalizando 12 conectores. Apesar do ensaio PO.22 conter seis conectores, as distâncias entre os conectores não permitiu o aproveitamento de todos para esse conjunto de análise, sendo então descartados dois conectores.

Os detalhes para a montagem e do rompimento do ensaio PO.22.P1 estão representados nas Figura 4.13 (a). Na Figura 4.13 (b) é apresentado o detalhe da montagem geral para o ensaio PO.22.P2. A Figura 4.14 apresenta os detalhes para a solda e o pino, após o rompimento dos ensaios realizados no perfil de PO.22. O rompimento dos ensaios PO.22.P1, PO.22.P2, PO.22.P3 e PO.22.P4 ocorreram devido a solda, conector, conector e solda, respectivamente.

A mesma configuração de representação, para a solda e o pinto, após a execução dos ensaios PO.11, são apresentadas na Figura 4.15. Para o caso dos ensaios de PO.11 a ruptura ocorreu por conta do conector, conector, solda e solda, para os ensaio PO.11.P1, PO.11.P2, PO.11.P3 e PO.11.P4, nessa ordem.

Os detalhes para o ensaio PO.12 é apresentado na Figura 4.16, referente a área da solda e a área do pino. O rompimento para os ensaios PO.12.P1, PO.12.P2, PO.12.P3, PO.12.P4 foram devido a solda, conector, solda e solda, respectivamente.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados de força máxima atingida para os ensaios realizados, o tipo de falha obtida e o valor médio para cada conjunto, bem como a tensão e o deslocamento previstos, comparados aos valores da perna de solda de 8 mm. Numericamente, a força média obtida para os ensaios do perfil PO.11 foi 80,02 kN, 6% superior ao previsto para as soldas com 10 mm de perna. Considerando-se os valores para tensão e deslocamento obteve-se 376,29 MPa e 20,34 mm, respectivamente, conforme pode-se observar na Tabela 4.7, superiores também em 6% dos valores previstos de 430,41 MPa e 19,14 mm, para a solda de perna de 10 mm. Pode-se ainda verificar que para esse conjunto, apenas o ensaio PO.11.P1 apresentou valor inferior de força de ruptura que o previsto para a solda de 10 mm.



Montagem – geral

Rompimento –detalhe pino

Montagem – geral

(a) PO.22.P1

(b) PO.22.P2

Figura 4.13 – Detalhes dos ensaios: (a) PO.22.P1 e (b) PO.22.P2.

	(a) Detalhe na solda	(b) Detalhe no pino
PO.22.P1		
PO.22.P2		
PO.22.P2		

Figura 4.14 – Ensaio do perfil PO.22: (a) detalhe na solda e (b) detalhe no pino.



Figura 4.15 – Ensaio do perfil PO.11: (a) detalhe na solda e (b) detalhe no pino.

Para os ensaios do perfil PO.12, também descritos na Tabela 4.7, a força média obtida foi de 48,40 kN, 34% inferior ao previsto para as soldas com 8 mm de perna, de 73,22 kN. Considerando-se os valores para tensão e deslocamento obteve-se 227,61 MPa e 12,30 mm, mantendo-se a porcentagem de inferioridade da força. Observa-se assim, que todos os ensaios não atingiram a força mínima prevista para a resistência do conjunto solda/ conector.

Em relação aos ensaios do perfil PO.22, incluídos na Tabela 4.7, a força média atingida foi de 104,92 kN, 43% superior ao valor previsto, o mesmo ocorrendo para a tensão e o deslocamento, 493,40 MPa e 26,67 mm, respectivamente. Nesse caso, todos os ensaios ultrapassaram o valor teórico para a solda de perna de 10 mm.

	(a) Detalhe na solda	(b) Detalhe no pino
PO.12.P1		
PO.12.P2		
PO.12.P3		
PO.12.P4		

Figura 4.16 – Ensaio do perfil PO.12: (a) detalhe na solda e (b) detalhe no pino.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios para previsão da solda.

Ensaio	Fmax (kN)	Falha	Falha prev _{NBR}	Fmed (kN)
PO.11.P1	99,20	Conector	Solda	80,02
PO.11.P2	62,66	Conector		
PO.11.P3	80,70	Solda		
PO.11.P4	77,51	Solda		
PO.12.P1	40,15	Solda	Solda	48,40
PO.12.P2	68,32	Conector		
PO.12.P3	48,16	Solda		
PO.12.P4	36,96	Solda		
PO.22.P1	98,29	Solda	Solda	104,92
PO.22.P2	111,68	Conector		
PO.22.P3	116,64	Conector		
PO.22.P4	93,07	Solda		
Ensaio	F _{prev_{NBR}} (kN)	<u>F_{med}</u> F _{prev}	τ (MPa)	δ _{max} (mm)
PO.11.PX	73,22	1,09	376,29	20,34
PO.12.PX	73,22	0,66	277,61	12,30
PO.22.PX	73,22	1,43	493,40	26,67

A Figura 4.17 apresenta os valores de obtidos para todo o ensaio.

A comparação entre os resultados obtidos com as pernas de solda pré-determinadas, foi realizada a previsão das pernas das soldas nesses ensaios, em relação a força máxima obtida em cada teste, considerando-se o tipo de ruptura obtida. Essa análise é apresentada na Tabela 4.8. Pode-se observar que nenhuma das soldas atingiu perna de solda superior a 10 mm. Considerando-se a perna média de execução da solda do conector de 8 mm, duas conseguem ser superior a esse valor, porém em relação ao total, ainda são poucas amostras.

Ressalta-se que os valores obtidos para as previsões de perna de solda consideraram para todos os casos que o valor máximo atingido corresponderia aos cálculos para o caso em que haveria o rompimento da solda, sem considerar as expressões relacionadas a resistência do conector.

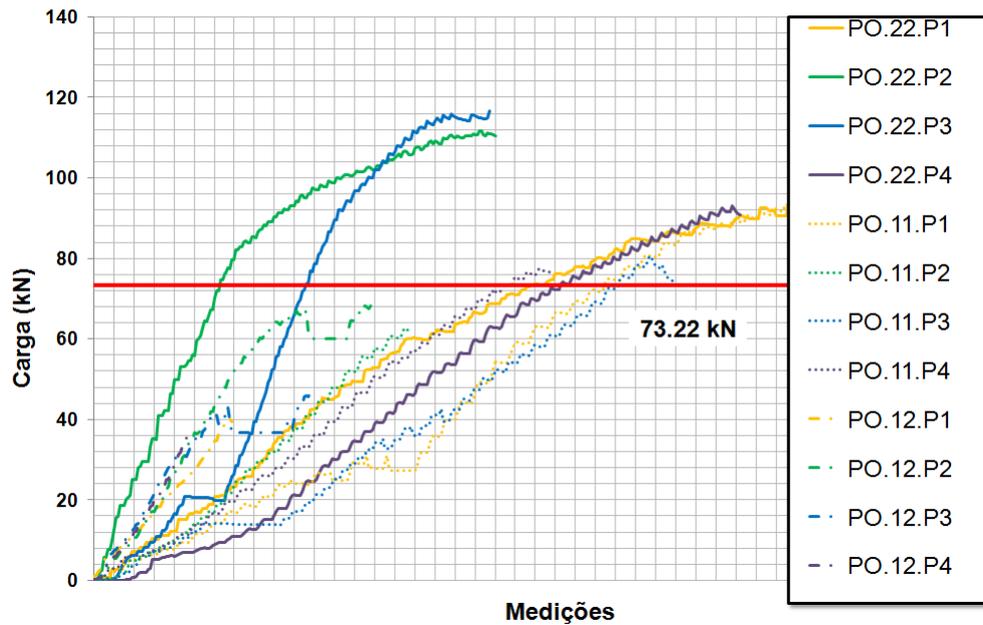


Figura 4.17 – Resultados dos testes com os perfis da Série S2014.

Tabela 4.8 – Previsão da perna da solda.

Ensaio	Falha	t ₁ (mm)	t ₂ (mm)	t ₃ (mm)	t (mm)	t _{ensaio} (mm)
PO.11.P1	Conector	10	7,99	6,31	6,31	10,70
PO.11.P2	Conector	10	5,05	3,98	3,98	1,80
PO.11.P3	Solda	10	6,50	5,13	5,13	5,80
PO.11.P4	Solda	10	6,24	4,93	4,93	5,00
PO.12.P1	Solda	10	3,23	2,55	2,55	-
PO.12.P2	Conector	10	5,50	4,34	4,34	2,60
PO.12.P3	Solda	10	3,88	3,06	3,06	-
PO.12.P4	Solda	10	2,98	2,35	2,35	-
PO.22.P1	Solda	10	7,92	6,25	6,25	10,20
PO.22.P2	Conector	10	8,99	7,10	7,10	12,00
PO.22.P3	Conector	10	9,39	7,42	7,42	12,20
PO.22.P4	Solda	10	7,50	5,92	5,92	9,00

Legenda:

t₁ - perna da solda teórica

t₂ - perna da solda do valor experimental por meio da expressão

t₃ - perna da solda comparação com os ensaios de pernas conhecidas

Comparando-se os resultados obtidos nos ensaios dos conectores com os *pull out* pode-se verificar se os valores alcançados foram compatíveis a previsão da resistência para os conectores, possibilitando estimar se seria possível ser realizado o ensaio de forma não modificada. Essa comparação é apresentada na Tabela 4.9. Observa-se que para os três ensaios estudados chega-se a estimativa de que os conectores resistiriam a realização do ensaio sem modificação, ou seja, com a contribuição da parcela dos conectores também sendo avaliada. Ressalta-se que a comparação foi realizada sem levar em conta as questões de mistura dos materiais e demais elementos do conjunto, que pode ter modificado os resultados apresentados.

Tabela 4.9 – Comparação dos resultados das previsões das pernas de solda.

Ensaio	Ensaio Conectores			Ensaio <i>pull out</i>			$t_{curva_p} / t_{curva_c}$
	$t_{fórmula}$ (mm)	t_{curva_c} (mm)	t_{curva_c} $t_{fórmula}$	$t_{fórmula}$ (mm)	t_{curva_p} (mm)	t_{curva_p} $t_{fórmula}$	
PO.11 ⁽¹⁾	5,46	7,17	1,31	5,6	7,6	1,36	1,06
PO.12	3,08	2,60	0,84	6,8	12,0	1,76	4,61
PO.22	6,68	10,85	1,62	9,0	13,0	1,44	1,20

(1) Excluído o valor de PO.11.P2, por ter sido muito diferente dos demais valores encontrados.

O gráfico da Figura 4.18 apresenta os resultados apresentados na Tabela 4.8. No mesmo gráfico também são mostrados os resultados dos ensaios com perna de solda conhecidos e a linha de tendência considerando-se esses resultados. Com essa relação, foi possível estimar a perna da solda esperada considerando-se o valor teórico e o valor obtido por meio da comparação as soldas existentes. Com os resultados obtidos, pode-se confirmar que, caso esses ensaios fossem realizados considerando-se a parcela do conector, ou seja, em sua forma de execução total, não seria possível alcançar os valores previstos de carga para cada um dos modelos estudados, conforme apresentado na Tabela 4.10.

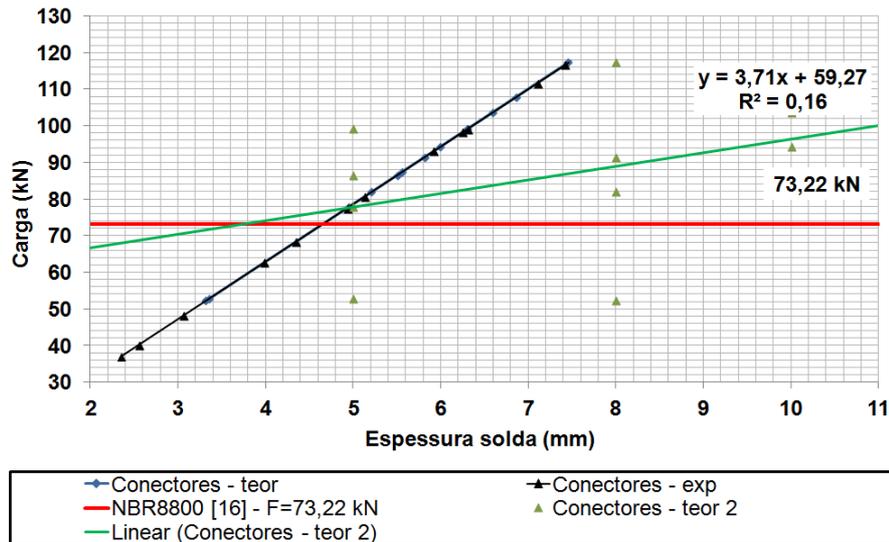


Figura 4.18 – Gráfico das soldas previstas comparadas as soldas padrões.

Tabela 4.10 – Comparação aos valores previstos para os ensaios nas soldas.

Ensaio	$F_{prev} (EC)$ (kN)	F_{med} (kN)	número conectores	$\sum F_{con}$ (kN)	$\frac{F_{con}}{F_{prev}}$
PO.11	402,1	80,02	4	320,08	79,6%
PO.12	402,1	48,40	4	193,60	48,1%
PO.22	713,4	104,92	6	629,52	88,2%

Extrapolando-se os resultados obtidos para todos os ensaios realizados, a Tabela 4.11 apresenta as comparações de pernas de solda para cada ensaio, considerando-se para isso apenas os ensaios que tiveram o modo de falha devido a ruptura da solda do conector. Detalhes sobre a ruptura de cada ensaios serão apresentados no item 4.2. Com o estudo é possível verificar que os valores obtidos em comparação tanto as fórmulas disponíveis como considerando-se os ensaios com pernas conhecidas apresentaram valores de perna de solda inferiores, o que confirma a ruptura ocorrendo nesse elemento.

Tabela 4.11 – Estudo da perna da solda.

Ensaio	$t_{\text{teórico (EC)}}^{(2)}$ (mm)		$t_{\text{exp}}^{(2)}$ (mm)		$t_{\text{exp}}^{(3)}$ (mm)		
	Prevista	Obtida	Prevista	Obtida	Prevista	Obtida	<u>Obtida</u> Prevista
PO.11.r	8,1	6,4	6,4	5,0	11,0	5,6	0,51
PO.12.r	8,1	7,1	6,4	6,1	11,0	9,9	0,90
PO.21	9,6	3,4	7,3	2,7	12,0	- ⁽¹⁾	-
PO.21.r	9,6	5,9	7,3	4,6	12,0	3,8	0,32
PO.23.r	9,6	5,6	7,3	4,4	12,0	2,6	0,22
PO.71.r	6,9	5,6	5,4	4,4	7,2	2,8	0,39
PO.73.r	6,9	5,8	5,4	4,6	7,2	3,8	0,53
PO.81.r	9,6	5,4	7,3	4,4	12,0	2,4	0,20
PO.91	9,6	7,6	7,3	6,0	12,0	9,6	0,80
PO.93	9,6	6,2	7,3	5,0	12,0	5,0	0,42

(1) Valor obtido muito inferior aos previstos nos ensaios com perna de solda conhecido, indicando quando comparado ao gráfico, valor negativo sendo, por isso, descartado.

(2) Calculado pela perna teórica do EC4.

(3) Calculado através da comparação com os ensaios de perna de solda conhecidas.

4.2.

Ensaio Pull Out

Para a apresentação dos resultados dos ensaios de *pull out*, a fim de facilitar o entendimento e a análise dos resultados, os ensaios foram agrupados conforme o modo de falha obtido. Serão apresentados os resultados dos ensaios dos materiais para os pré-ensaios, Série S2010 e Série S2014. Em seguida, os resultados dos ensaios, e por último, as comparações entre eles.

O resumo dos resultados obtidos para cada ensaio encontra-se no Apêndice A.

Para os pré-ensaios foram utilizados os extensômetros nas posições apresentadas na Figura 4.20. A posição dos pares internos teve o objetivo de obter o comportamento nas barras na região entre os conectores de cisalhamento e os pares externos foram posicionados próximos à laje de

concreto pressupondo-se ser o ponto externo com maior nível de tensão na barra.

A Figura 4.19 mostra o posicionamento de cada grupo de transdutores de deslocamentos (LVDTs). Os LVDTs posicionados na parte inferior do ensaio mediram o deslocamento relativo entre o perfil metálico e as lajes de concreto (LVDTs 1 e 2). Os LVDTs laterais identificavam o deslocamento relativo ao desequilíbrio da estrutura para qualquer direção no plano horizontal (LVDTs 3, 4, 5 e 6). Os LVDTs superiores determinavam os valores dos deslocamentos verticais do pull out, referente ao deslocamento relativo entre aço e concreto (7, 8, 9 e 10).

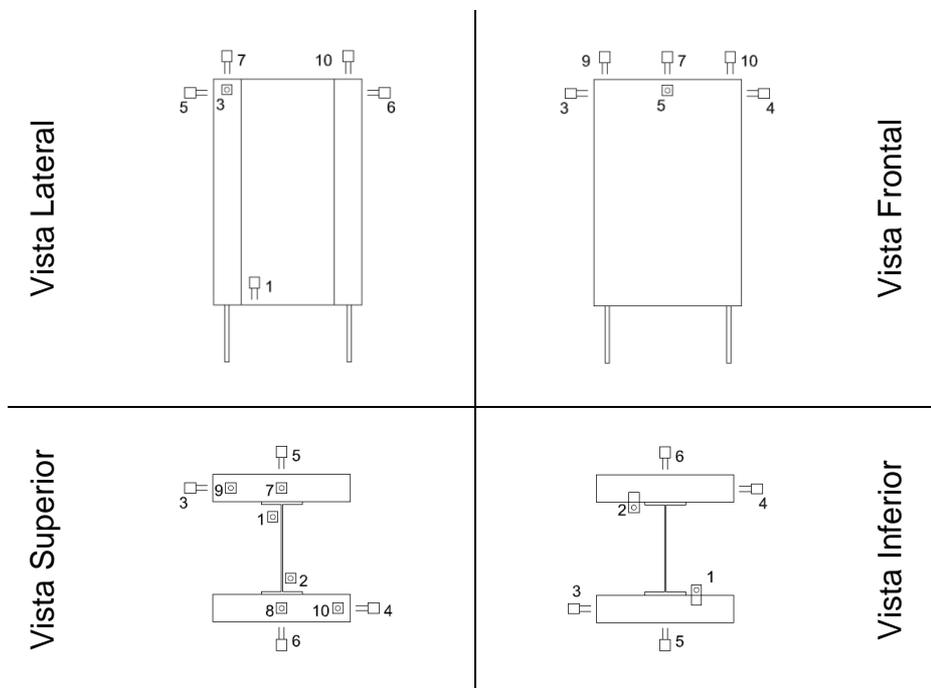


Figura 4.19 – Localização e identificação dos LVDTs para os pré-ensaios e da Série S2010.

A Figura 4.21 apresenta o padrão utilizado por Ramires (2010) para os grupos de extensômetros estudados, referente aos ensaios com duas barras em cada laje de concreto para os ensaios da Série S2010. Observa-se na Figura 4.21 (a) a numeração dos extensômetros, e na Figura 4.21 (b) os grupos em que esses elementos foram divididos, a fim de analisar os resultados obtidos.

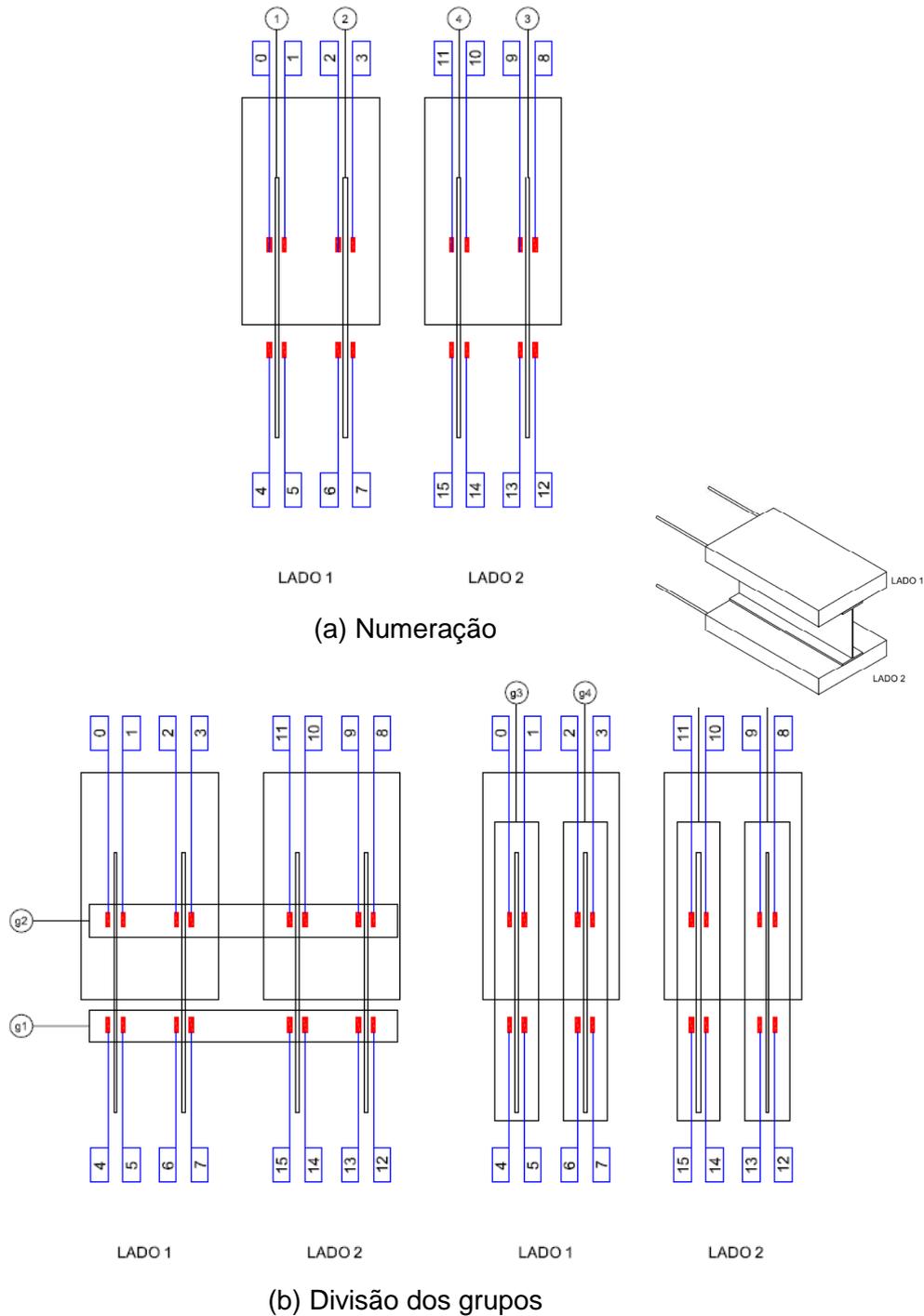


Figura 4.21 – Posicionamento dos extensômetros para ensaios com duas barras (Série S2010).

A Figura 4.23 representa a configuração dos extensômetros para o caso de quatro barras, com a Figura 4.23 (a) apresentando a numeração e a Figura 4.23 (b) a divisão dos grupos.

Para a análise foram criados grupos de extensômetros para a verificação do resultado do conjunto. Com essa divisão é possível estudar as influências existentes entre os extensômetros internos e externos. Para os ensaios com duas barras, cada um dos lados da laje, denominados Lado 1 e Lado 2, foram divididos dois grupos, sendo: g3 e g4 para o Lado 1 e g5 e g6 para o Lado 2. Os grupos g1 e g2 correspondem aos extensômetros transversais internos e externos a laje de concreto. Para as séries com quatro barras, os grupos correspondentes ao Lado 1 são g3 a g6, e ao Lado 2 g7 a g10, mantendo-se os grupos g1 e g2 para o conjunto transversal.

Para o grupo de transdutores de deslocamento (LVDTs) a Figura 4.22 apresenta o posicionamento desses instrumentos responsáveis pela medição dos deslocamentos, isto é, para medição dos deslocamentos em cada um dos lados 1 e 2 da laje. As posições foram escolhidas conforme apresentado para os pré-ensaios, sendo na parte inferior os LVDTs 1 e 2, no plano horizontal os LVDTs 3, 4, 5 e 6, e na parte superior os LVDTs 7 e 8.

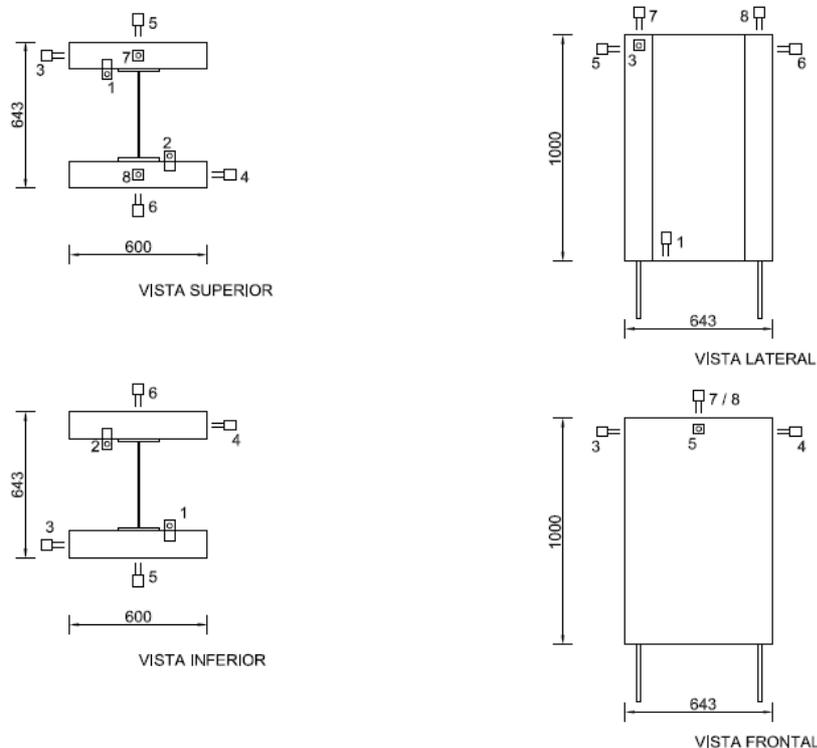
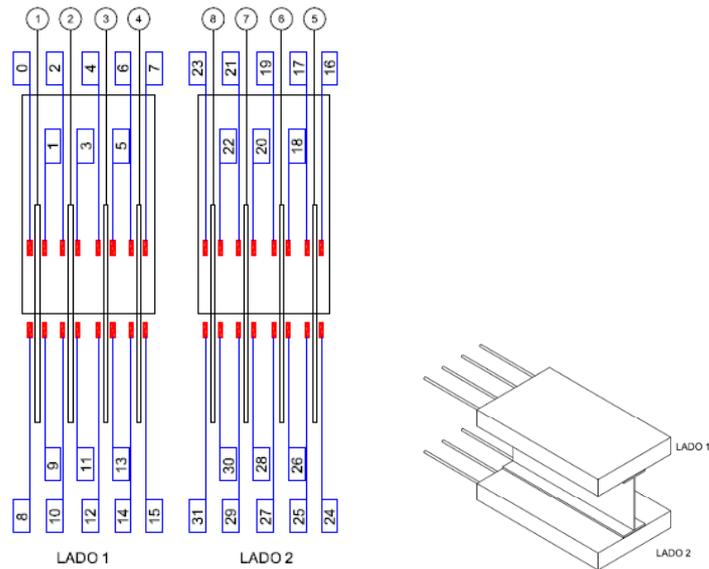
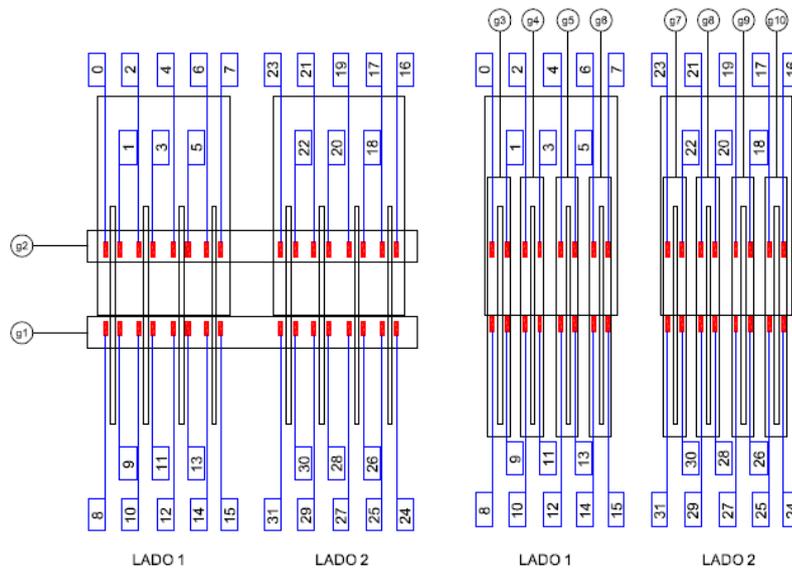


Figura 4.22 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento (LVDTs) - Série S2010.



(a) Numeração



(b) Divisão dos grupos

Figura 4.23 – Posicionamento dos extensômetros para ensaios com quatro barras (Série S2010).

A Figura 4.24 apresenta o padrão utilizado para os extensômetros da Série S2014, referente aos ensaios com duas barras em cada laje de concreto, sendo: (a) a numeração dos extensômetros e (b) os grupos em que esses elementos foram divididos. A Figura 4.25 mostra o mesmo esquema anterior, referente aos ensaios com quatro barras em cada laje.

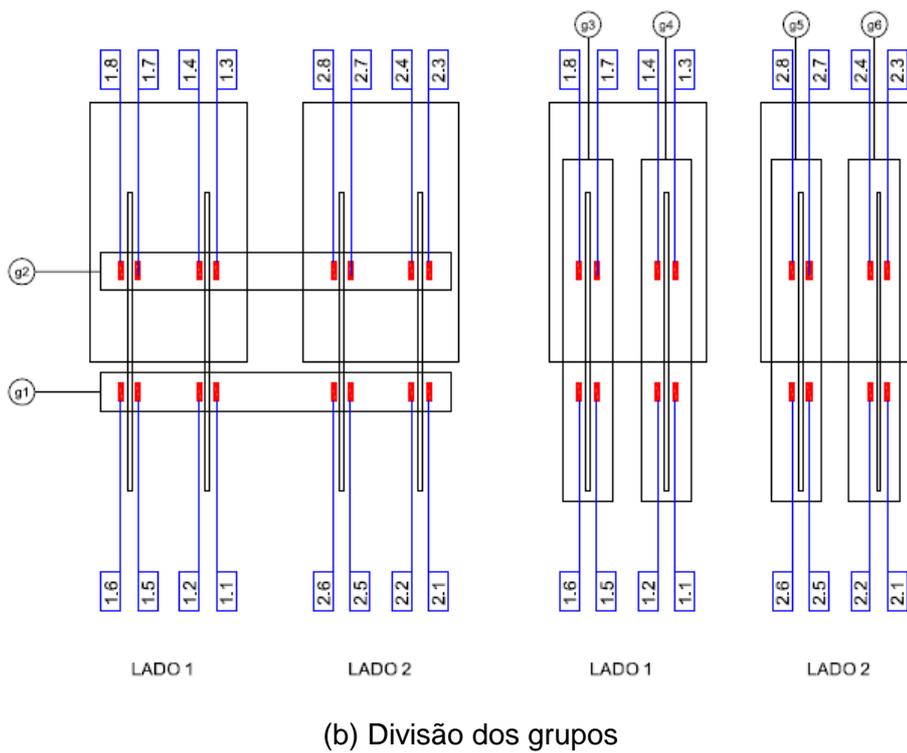
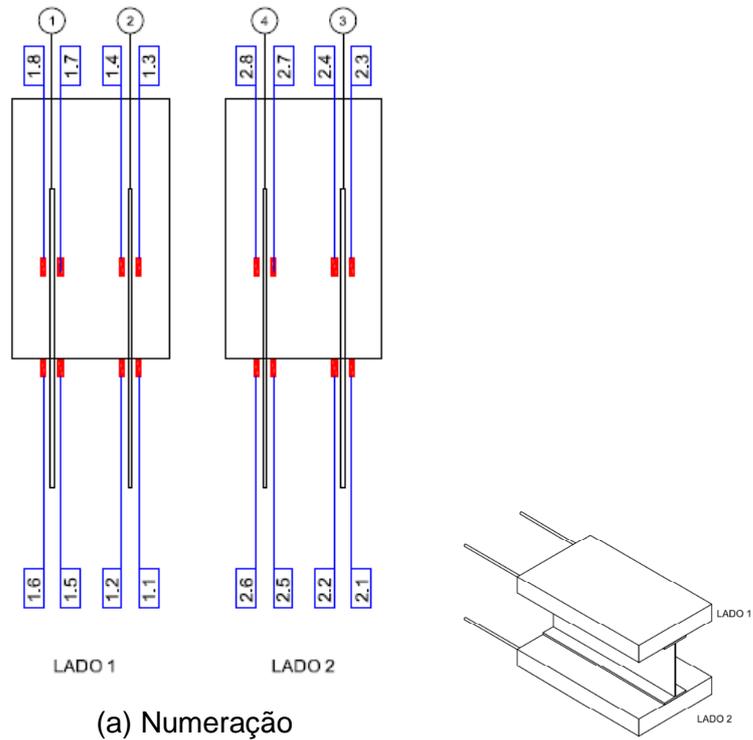
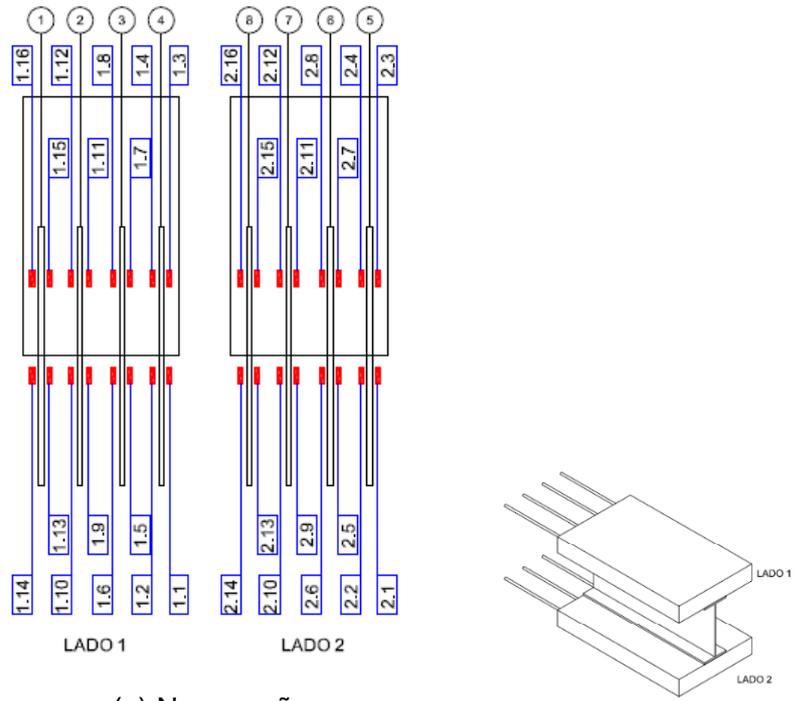
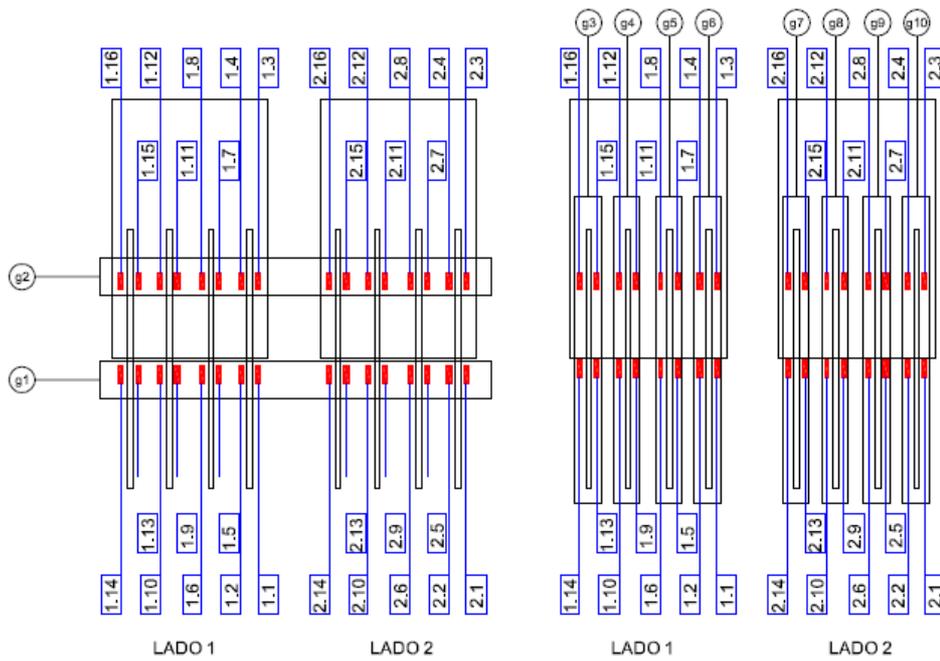


Figura 4.24 – Posicionamento dos extensômetros para ensaios com duas barras (Série S2014).



(a) Numeração



(b) Divisão dos grupos

Figura 4.25 – Posicionamento dos extensômetros para ensaios com quatro barras (Série S2014).

A divisão dos grupos apresentada corresponde a mesma apresentada para a Série S2010.

Para o posicionamento dos transdutores de deslocamento (LVDTs), foi utilizado o apresentado na Figura 4.26.

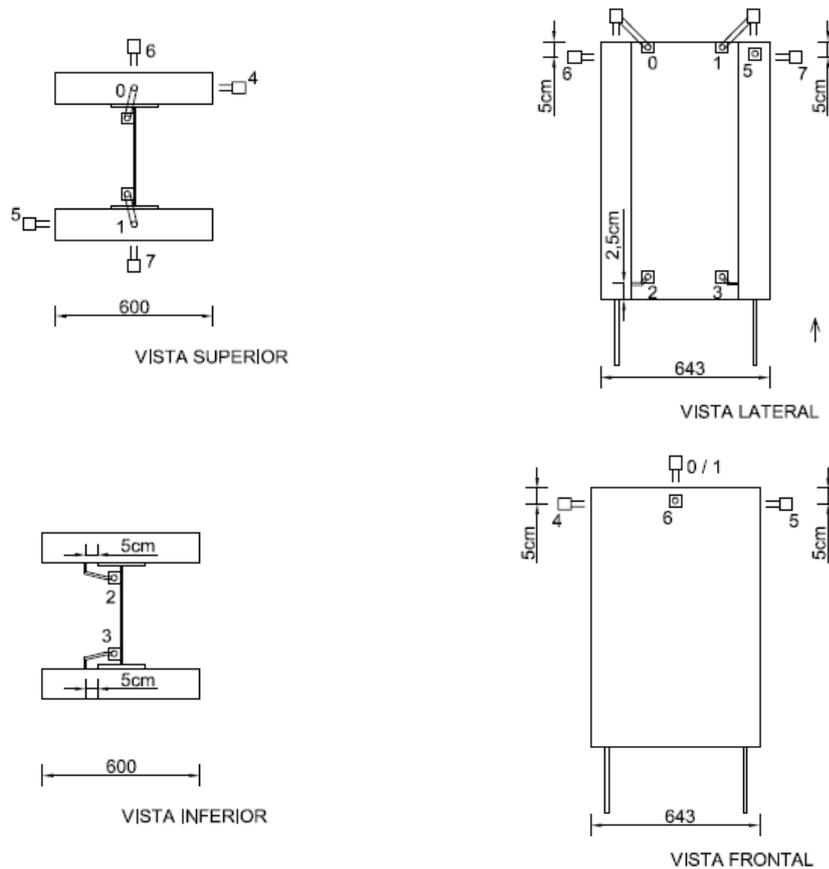


Figura 4.26 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento (LVDTs) - Série S2014.

4.2.1. Ensaios dos materiais

4.2.1.1. Pré-ensaios

A resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) utilizado foi especificada em 30 MPa, para todos os ensaios realizados. Foi verificado, com os rompimentos dos corpos de prova, que o concreto para os pré-ensaios atingiu o valor de f_{ck} de 28 MPa.

Para o aço empregado foram considerados os valores padrões dos materiais, de acordo com os diferentes tipos utilizados.

4.2.1.2. Série S2010

A resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) utilizado foi especificada em 30 MPa, para todos os ensaios realizados. Para os ensaios subsequentes (da Série S2010) realizados por Ramires (2010), o f_{ck} obtida foi de 29 MPa.

Conforme descrito para os aços utilizados para os pré-ensaios, esse material não foi ensaiado, sendo então utilizado o valor de referência.

4.2.1.3. Série S2014

4.2.1.3.1. Aço

Foram realizados ensaios para a determinação das características físicas dos materiais, tendo sido analisados a barra da armadura e a alma e a mesa do perfil.

Para a barra de armadura, foram obtidos os seguintes resultados, conforme Tabela 4.12. A Figura 4.27 mostra os gráficos referentes aos três corpos de prova. Os resultados obtidos para o CP1_Barra foram descartados para o cálculo da média para as características da barra, pois o rompimento do corpo de prova ocorreu antes do esperado, e por esse motivo encontra-se em cinza na tabela.

Tabela 4.12 – Resultados dos corpos de prova da barra.

Corpos de prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (GPa)
CP1_Barra ⁽¹⁾	516,30	519,48	230,74
CP2_Barra	574,87	762,67	237,62
CP3_Barra	580,60	801,50	266,26
Média	577,74	782,09	251,94
Desvio padrão	2,87	19,42	14,32
Obtido / Esperado	1,16	1,45	1,23
(1) Valores descartados			

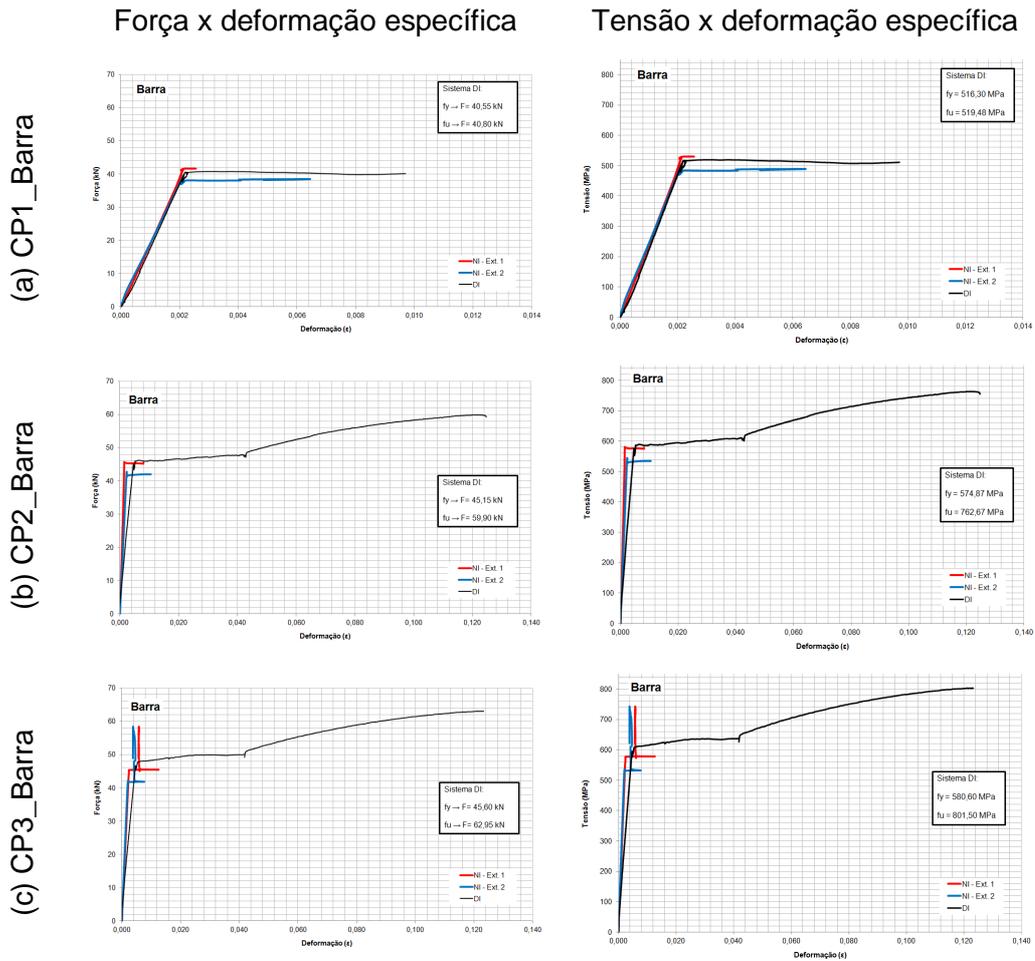


Figura 4.27 – Gráficos para o aço da barra.

Para os ensaios para a mesa da viga, foram obtidos os seguintes resultados, conforme Tabela 4.13. A Figura 4.28 mostra os gráficos referentes aos três corpos de prova.

Tabela 4.13 – Resultados dos corpos de prova da mesa do perfil.

Corpos de prova	fy (MPa)	fu (MPa)	E (GPa)
CP1_Mesa	341,12	414,46	190
CP2_Mesa	333,43	423,14	184,52
Média	337,28	418,80	187,26
Desvio padrão	3,85	4,34	2,74
Obtido / Esperado	0,98	0,93	0,91

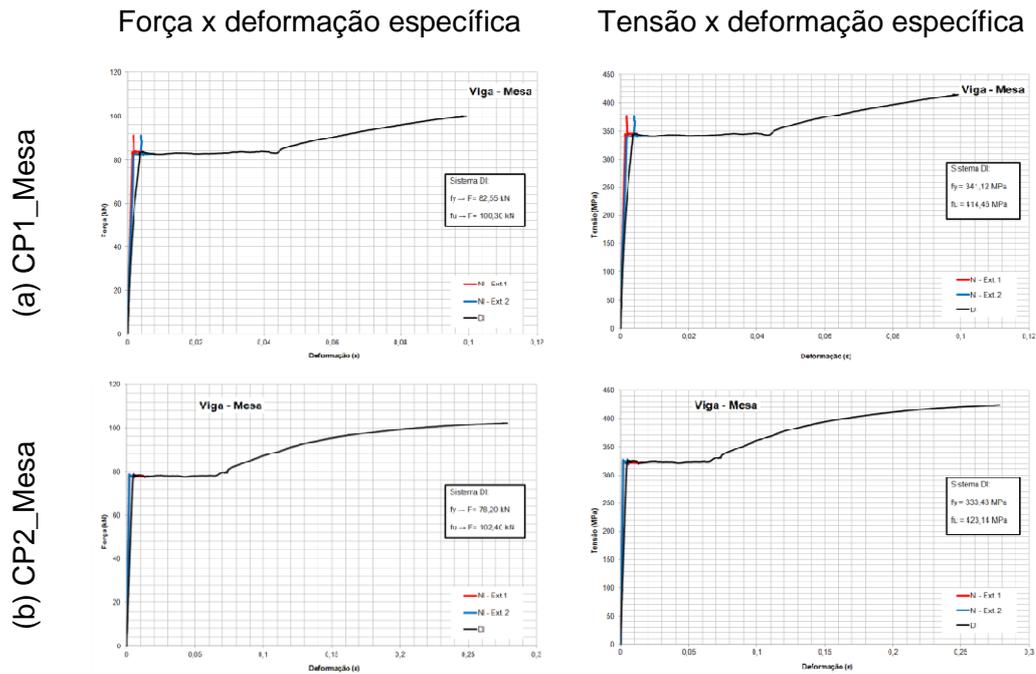


Figura 4.28 – Gráficos para o aço da mesa do perfil.

Para a alma da viga, os ensaios alcançaram os seguintes resultados, conforme Tabela 4.14. A Figura 4.29 mostra os gráficos referentes aos três corpos de prova.

Tabela 4.14 – Resultados dos corpos de prova da alma do perfil.

Corpos de prova	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (GPa)
CP1_Alma	393,10	489,76	205,15
CP2_Alma	400,00	484,76	206,81
CP3_Alma	397,86	464,52	198,38
Média	396,99	479,68	203,45
Desvio padrão	2,59	10,11	3,38
Obtido / Esperado	1,15	1,07	0,99

A Figura 4.30 apresenta a preparação dos ensaios da barra. A Figura 4.31 mostra a montagem dos ensaios para a alma do perfil. Por último, a Figura 4.32 apresenta o posicionamento dos corpos de prova para a mesa do perfil.

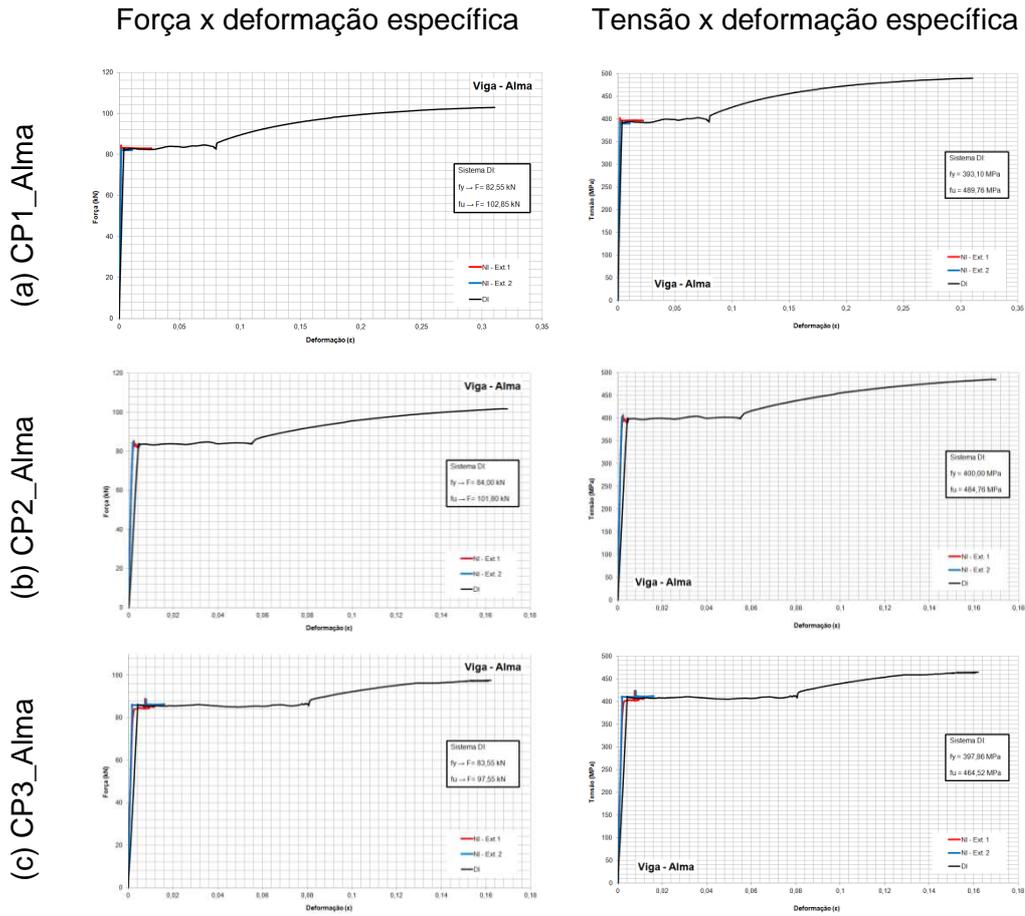


Figura 4.29 – Gráficos do aço para a alma do perfil.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0921385/CA

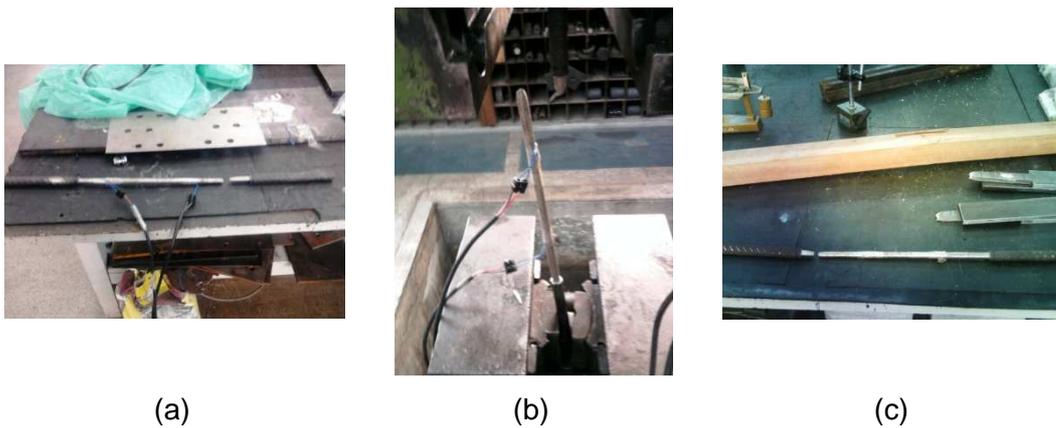


Figura 4.30 – Ensaios barra: (a) CP1_Barra; (b) CP2_Barra; (c) CP3_Barra.

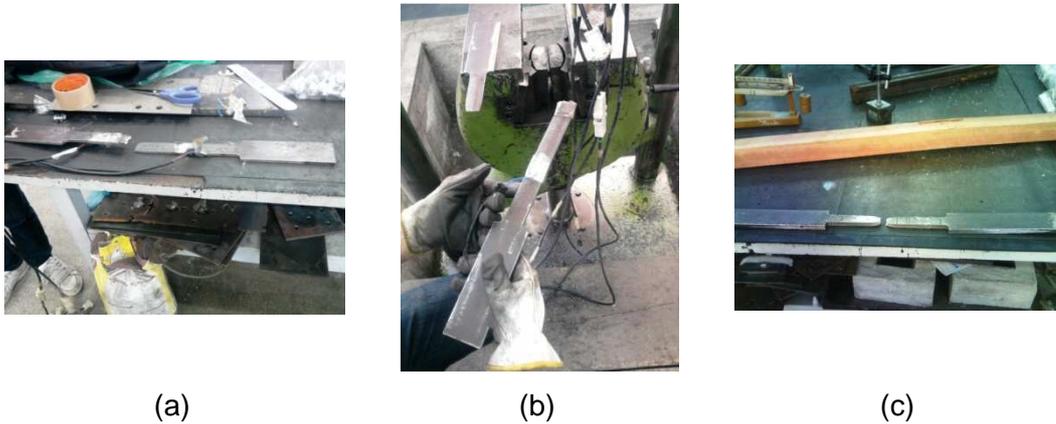


Figura 4.31 – Ensaio alma do perfil: (a) CP1_Alma; (b) CP2_Alma; (c) CP3_Alma.

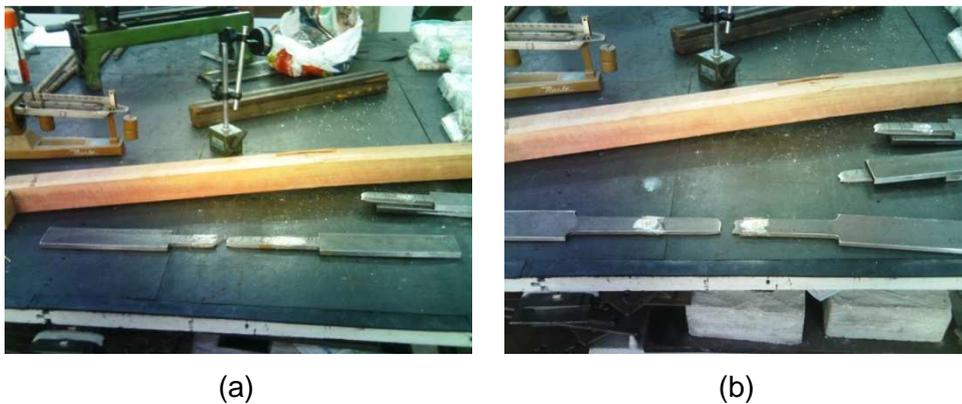


Figura 4.32 – Ensaio alma do perfil: (a) CP1_Mesa; (b) CP2_Mesa.

Como conclusões pode-se apontar que as amostras ensaiadas atenderam as exigências a NBR 6892/2002, levando-se em consideração a incerteza associada, para os ensaios realizados. Pode-se observar que para o caso dos corpos de prova da barra redonda, o rompimento nos ensaios ocorreu próximo a área útil na extremidade. Esse fato pode ser associado a erro na usinagem e falta de acabamento final da mesma, o que possibilitou um ponto frágil da área, onde ocorreu a ruptura.

Foi verificado também que os extensômetros romperam, para todos os ensaios, no momento da passagem elástica para plástica, ocasionado, provavelmente, devido ao rompimento da cola usada para a fixação. Porém, os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios.

4.2.1.3.2. Concreto

Para as novas séries produzidas foram levantados os valores de resistência a compressão, a tração e o módulo de elasticidade.

A Figura 4.33 apresenta o rompimento de alguns corpos de prova realizados no laboratório da UERJ (Fonseca Teles), por meio do ensaio de compressão simples.



Figura 4.33 – Rompimento dos corpos de prova - UERJ.

Os resultados obtidos para o rompimento dos corpos de prova são apresentados na Tabela 4.15, correspondentes aos valores da resistência média à compressão do concreto (f_{cm}). Devido a problemas verificados durante a execução dos ensaios de rompimento do concreto, os valores utilizados para obter a resistência à compressão do concreto aos 28 dias (f_{c28}), foram convertidos de datas posteriores a previsão inicial de testes. Para tanto, são utilizadas a equação (4.1) e equação (4.2).

$$\beta = e^{\left(s \left(1 - \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right)} \quad (4.1)$$

$$\beta = \frac{f_{ckj}}{f_{ck}} \quad (4.2)$$

Os valores obtidos através dos ensaios de compressão simples realizados correspondem aos valores de resistência à compressão do concreto (f_c). Para comparação ao valor da resistência característica à compressão do concreto esperada (f_{ck}) seguiu-se o prescrito nas normas, conforme equação (4.3), considerando que o desvio-padrão (S_d) para os ensaios realizados corresponde a condição A, com valor de 4,0.

$$f_{ckest} = f_{c28} - 1,65S_d \rightarrow S_d = 4,0$$

$$30 = f_{c28} - 1,65 \times 4,0 \rightarrow f_{c28} = 36,6 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

Tabela 4.15 – Resultados dos ensaios a compressão simples.

Local	Dimensões CP		Dias corridos	Carga (tf)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{cm28} (MPa)
	Diâm (m)	Altura (m)					
PUC	0,15	0,30	82	79,42	44,9	48,7	41,6
	0,15	0,30	82	86,12	48,7		
UERJ	0,10	0,20	118	36,58	46,6	48,0	39,5
	0,10	0,20	118	33,85	43,1		
	0,10	0,20	118	37,72	48,0		
	0,10	0,20	118	33,31	42,4		
PUC	0,10	0,20	125	31,69	40,4	41,6	34,0
	0,10	0,20	125	31,68	40,3		
	0,10	0,20	125	32,64	41,6		
PUC	0,15	0,30	202	77,70	44,0	49,4	39,0
	0,15	0,30	202	70,65	40,0		
	0,15	0,30	202	85,12	48,2		
	0,15	0,30	202	87,36	49,4		
	0,15	0,30	202	77,35	44,1		
							38,5

A resistência média à compressão do concreto aos 28 dias (f_{cm28}) para os ensaios da Série S2014 é de 38,5 MPa. O valor esperado era de 36,6 MPa, sendo desta forma 5% superior ao previsto.

Podem-se apontar diversos motivos para a variação de resultados encontrados, citam-se alguns:

- A inclusão da fibra, pela concreteira, processo comum em concreto usinado, pode aumentar a resistência do concreto, porém, como informado pelos próprios fabricantes, sua principal atribuição é reduzir a fissuração do concreto, atuando de forma pouco significativa na resistência. A concentração deste material em cada corpo de prova que pode ter modificado os resultados obtidos em cada um dos moldes.
- Alguns corpos de prova foram moldados com o apoio do vibrados e outros não. As formas diferentes de adensamento podem provocar valores diferentes quando os corpos são rompidos.
- Desnivelamento do corpo de prova. O capeamento nivela a superfície do corpo de prova, porém a pressão atuará de forma diferenciada em cada ponto do corpo de prova, caso esse não tenha sido executado com o cuidado de nivelamento do próprio material. Assim, o rompimento pode ocorrer de forma não esperado e com valores diferentes.
- O equipamento que se encontrava na PUC precisou de nova calibração, depois de verificado a diferença entre os valores obtidos. Tal procedimento foi executado, constatou-se que os resultados foram próximos aos obtidos com o equipamento da UERJ.
- Segundo a norma NBR 5738:2008 a cura dos corpos de prova necessitaria de tanques para imersão, fato que não ocorreu nos moldes utilizados. O mastique utilizado para o nivelamento também pode apresentar valores diferentes da forma padrão apresentada na norma NBR 5738:2008 realizado com o capeamento de enxofre.
- O transporte dos corpos de prova pode ter facilitado o rompimento do ensaio com resistência menor, conforme verificado na data de 16 de janeiro.

Foi realizado o estudo da resistência à tração, por meio da compressão diametral dos ensaios. Para a sua realização, um corpo de prova cilíndrico é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa, sendo aplicada uma força até a sua ruptura por tração indireta (ruptura por fendilhamento). A Figura 4.34 apresenta os corpos de prova preparados e sendo ensaios. Os ensaios seguiram o prescrito pela NBR 7222/ 2011 e os resultados são apresentados na Tabela 4.16.

A resistência do concreto à tração indireta ($f_{ct,sp}$) é igual a 3,637 MPa.

Para o concreto ainda foi realizado o ensaio para determinação do módulo de elasticidade. O procedimento de ensaio seguiu o prescrito na NBR 8522/

2008 e a Tabela 4.17 apresenta os resultados encontrados. A Figura 4.35 mostra os corpos de prova prontos para serem rompidos, com a colagem dos extensômetros realizada.

Para a avaliação dos elementos estudados adota-se um módulo de elasticidade único, à tração e à compressão, igual ao módulo de elasticidade secante (E_{cs}).

Pode-se perceber pela tabela que o valor do módulo de elasticidade do concreto utilizado é de 23,908 MPa. O valor esperado para o concreto com resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) de 30 MPa, de acordo com a NBR 6118/2007, é de 26,072 GPa, dando uma diferença de 8% inferior. Considerando-se que o f_{cm28} obtido pelos ensaios foi de 38,5 MPa, que corresponde a um valor de f_{ck} de 31,9 MPa, o valor esperado seria 26,884 GPa, sendo 3% superior ao valor esperado.



(a) preparação



(b) realização

Figura 4.34 – Ensaio de tração do concreto.



Figura 4.35 – Corpo de prova para determinação do módulo de elasticidade.

Tabela 4.16 – Resultados dos ensaios a compressão diametral.

Grupo	Dimensões CPs		Dias corridos	Carga (tf)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	f_{ct,sp_medio} (MPa)
	Diâm (m)	Altura (m)				
1	0,15	0,30	28	232,33	3,287	3,712
	0,15	0,30	28	273,67	3,852	
	0,15	0,30	28	251,06	3,552	
	0,15	0,30	28	293,91	4,158	
2	0,15	0,30	66	232,33	3,287	3,035
	0,15	0,30	66	273,67	3,852	
	0,15	0,30	66	251,06	3,552	
	0,15	0,30	66	293,91	4,158	
	0,15	0,30	66	259,54	3,646	
	0,15	0,30	66	224,57	3,149	
	0,15	0,30	66	214,31	2,992	
	0,15	0,30	66	215,92	3,033	
	0,15	0,30	66	208,57	2,926	
	0,15	0,30	66	243,94	3,408	
	0,15	0,30	66	231,73	3,241	
3	0,15	0,30	195	305,55	4,317	4,164
	0,15	0,30	195	299,31	4,220	
	0,15	0,30	195	334,23	4,410	
	0,15	0,30	195	261,54	3,679	
	0,15	0,30	195	284,34	4,022	
	0,15	0,30	195	292,42	4,010	
	0,15	0,30	195	301,71	4,268	
	0,15	0,30	195	276,72	3,909	
	0,15	0,30	195	335,13	4,741	
	0,15	0,30	195	287,33	4,065	
						3,637

Tabela 4.17 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.

Grupo	Dimensões CPs		Dias corridos	E _{cs} (GPa)	E _{ci} (GPa)	E (GPa)
	Diâm (m)	Altura (m)				
1	0,15	0,30	29	22,593	26,580	25,086
	0,15	0,30	29	28,702	33,767	
	0,15	0,30	29	23,624	27,793	
	0,15	0,30	29	24,248	28,527	
	0,15	0,30	29	26,261	30,895	
2	0,15	0,30	202	22,489	26,458	22,729
	0,15	0,30	202	24,554	28,887	
	0,15	0,30	202	20,853	24,533	
	0,15	0,30	202	23,020	27,082	
						23,908

4.2.2.

Resultados dos ensaios

4.2.2.1.

Resultados dos pré-ensaios

Os pré-ensaios tinham o objetivo de definir a melhor forma de executar os ensaios principais.

O ensaio PO.0.1 buscou a calibração dos valores de carga aplicados e a verificação do modo de colapso das barras de armadura, preparando assim o conjunto para os demais ensaios. Até a ruptura do sistema, foram necessárias modificações no ensaio PO.0.1 para adequá-lo.

No ensaio PO.0.2, que já considerou as modificações do ensaio PO.0.1, não foram observados problemas na estrutura de travamento, chegando assim a ruptura do conjunto. Porém, o modo de ruptura foi diferente do esperado, já que o previsto era o rompimento da barra de armadura e ocorreu a ruptura do conector por cisalhamento.

As melhorias empregadas foram utilizadas para a realização dos ensaios principais das Série S2010. As forças obtidas estão descritas na Tabela 4.18, em conjunto ao modo de ruptura.

Tabela 4.18 – Resultados dos pré-ensaios (Ramires, 2010).

Modelo	Força (kN)		Modo de ruptura	
	Prevista _(EC)	Obtida	Previsto _(EC)	Obtido
PO.0.1	402,1	513,0	Barra	Barra
PO.0.2	402,1	473,0	Barra	Conector

Foi previsto a ruptura do pré-ensaio PO.0.1 para o valor de 513 kN, com o colapso do rompimento da barra de armadura principal. Durante a realização desse ensaio, verificou-se que logo após o valor de 30% da carga de ruptura prevista (120,6 kN) ocorria um deslocamento da cabeça do cursor do macaco hidráulico, por ser rotulada, havendo a necessidade da paralisação. Duas outras tentativas foram realizadas e por fim, optou-se pela retirada desse elemento rotulado, conforme Figura 4.36. Após a alteração foi possível levar o ensaio até a ruptura.

**Figura 4.36 – Macaco hidráulico sem a cabeça rotulada.**

O colapso do pré-ensaio PO.0.1 ocorreu devido à ruptura da barra de armadura de número 1, lado 1, com o modo de ruptura previsto, ou seja, ruptura na barra de armadura, com uma carga igual a 513 kN. No gráfico apresentado na Figura 4.38 pode ser observado o comportamento carga *versus* deformação específica do grupo de extensômetros g2/ lado 2 e g3. Observa-se que os extensômetros 35 e 36 ultrapassam o limite de escoamento.

Dos valores obtidos e apresentados no Apêndice A, pode-se observar que:

- A força total obtida pela célula de carga foi 33% superior a prevista.
- Comparando-se os valores para uma barra referente aos cálculos pelos extensômetros e pela força prevista, observa-se um valor de 7% superior para a esperada.

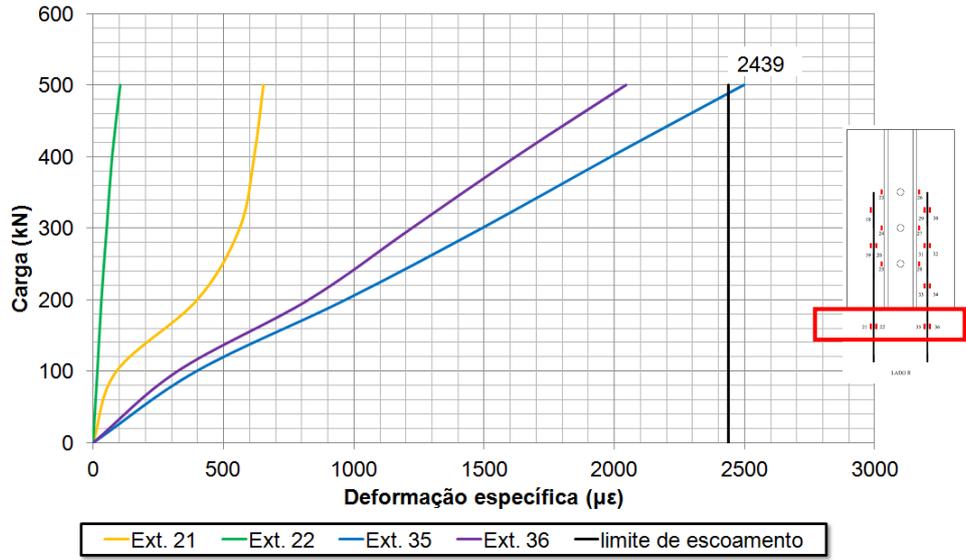
- A tensão normal e a tensão de arrancamento também foram inferiores em 7%.
- Há grande diferença de solicitações nas barras, tendo os maiores valores na barra 4, onde ocorreu a ruptura. O desequilíbrio entre os lados também pode ser observada com essa comparação de barras.

A Figura 4.39 apresenta a curva carga *versus* deslocamento dos LVDTs. O transdutor de deslocamento LVDT 1 apresenta um aumento de deslocamentos sem acréscimo de carga, mostrando a aproximação rápida da ruptura. Os LVDTs 8, 9 e 10 mostram os deslocamentos verticais do ensaio, sendo medida na porção superior das lajes de concreto.

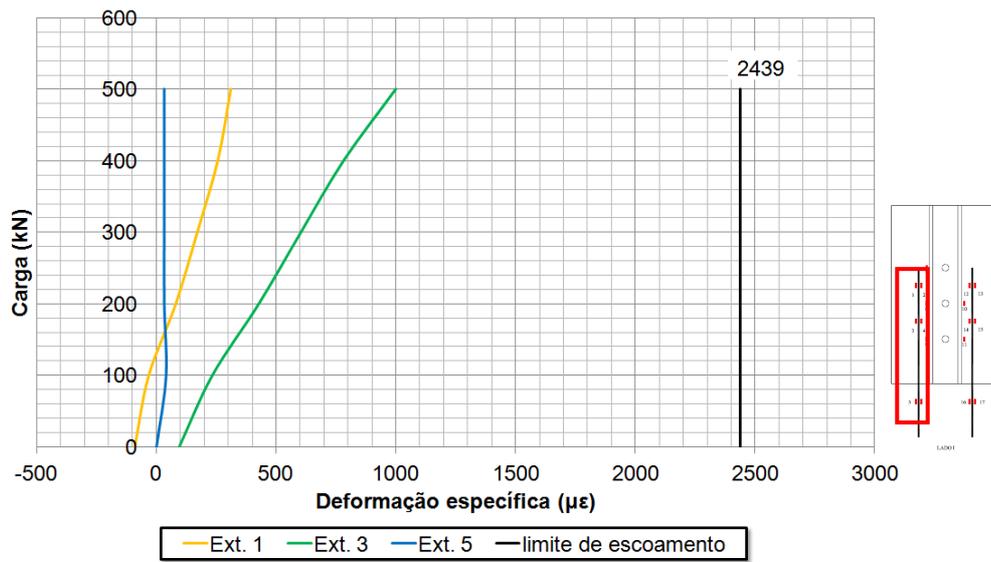
O pré-ensaio PO.0.2 não apresentou variações durante a execução do ensaio, sendo realizado o processo completo, com previsão de ruptura no valor de 402 kN, com o colapso por meio do rompimento da barra de armadura, sendo seguida pela ruptura da ancoragem com o valor de 569,4 kN. O valor encontrado foi de 473 kN, com o colapso devido à ruptura do conector de cisalhamento, no lado II, conforme Figura 4.37.



Figura 4.37 – Ruptura do pré-ensaio PO.0.2.



(a) Grupo g2 – lado 2



(b) Grupo g3

Figura 4.38 – Carga versus deformação específica dos grupos g2 e g3 – PO.0.1.

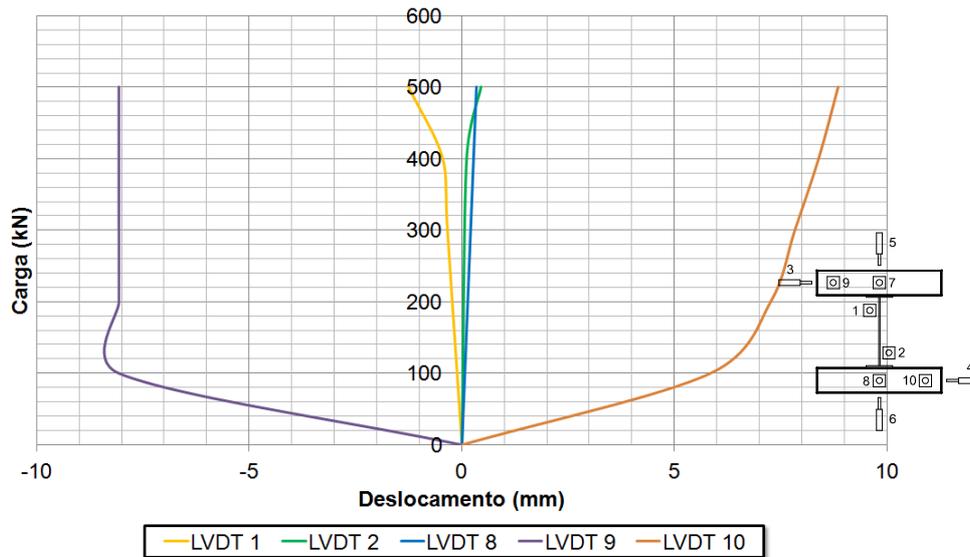


Figura 4.39 – Carga versus deslocamento dos LVDTs 1, 2, 8, 9 e 10 – PO.0.1.

O gráfico apresentado na Figura 4.40 traz o comportamento força *versus* deformação específica do grupo de extensômetros g2, que se localizam externamente a laje de concreto. Observa-se que o Ext. 23 ultrapassou o valor limite de escoamento do aço e os Ext. 3 e Ext. 16 chegaram próximo a isso.

Dos valores obtidos para o ensaio PO.0.2 e apresentados no Apêndice A, pode-se observar que:

- A força total obtida pela célula de carga foi 4% superior a prevista, situando-se dentro do limite de tolerância.
- Comparando-se os valores para uma barra referente aos cálculos pelos extensômetros e pela força total, observa-se que a força total é superior em 6%.
- Observa-se a grande diferença de solicitações nas barras e entre as barras de mesmo lado, sendo a diferença entre os somatórios das barras superior a 50%. O desequilíbrio entre os lados também pode ser observada com essa comparação de barras.

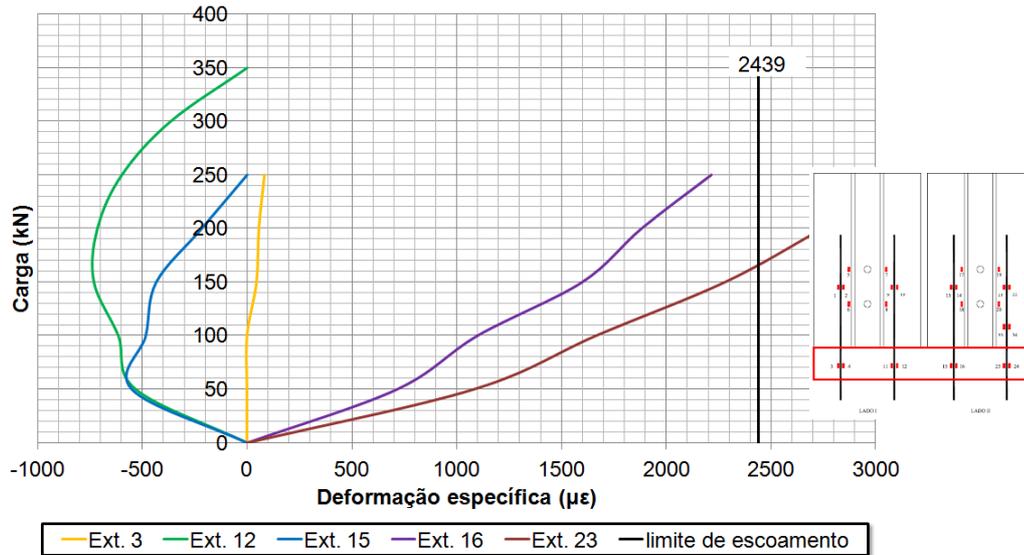


Figura 4.40 – Carga versus deformação específica dos grupos g2 - PO.0.2.

A Tabela 4.19, Tabela 4.20 e Tabela 4.21 apresenta os resultados obtidos quanto a deformações, forças e tensões para o momento da ruptura dos ensaios. Pode-se observar maiores deformações obtidas para o ensaio PO.0.2, que levou a maiores solicitações envolvidas no ensaio. Em relação a comparação dos resultados previstos e obtidos, pode-se verificar que as relações foram próximas para os dois ensaios. Com os valores obtidos conclui-se que o objetivo de calibrar os modelos para os ensaios principais foi atingida.

Tabela 4.19 – Resultados obtidos para os pré-ensaios – forças (parte 1).

Ensaio	Deformação específica ($\mu\epsilon$)		Carga total (E_C) (kN)	
	Interna	Externa	Prevista	Obtida
PO.0.1	950,4	2271,2	402,10	535,00
PO.0.2	904,8	6360,8	402,10	385,00

Tabela 4.20 – Resultados obtidos para os pré-ensaios – forças (parte 2).

Ensaio	Força (kN)					
	F/barra			F_barra		
	Prevista	Obtida	Obt/prev	Prevista	Obtida	Obt/prev
PO.0.1	100,53	133,75	1,33	100,53	93,61	0,93
PO.0.2	118,30	96,30	0,81	110,53	102,50	0,93

Tabela 4.21 – Resultados obtidos para os pré-ensaios – tensões.

Ensaio	Tensão normal (MPa)				Tensão arrancamento (MPa)			
	Célula	Def	Prev	Def/prev	Célula	Def	Prev	Def/prev
PO.0.1	665,22	465,59	500,00	0,93	4,09	2,87	3,08	0,93
PO.0.2	478,70	509,80	500,00	1,02	2,90	3,10	3,10	1,00

4.2.2.2.**Ruptura pela Solda do Conector**

Durante a execução dos ensaios não modificados foi verificado que seu rompimento ocorreu devido à ruptura da solda do conector. Esse modo de falha não estava previsto. Para analisar os resultados e as pernas de solda desses ensaios foi realizado o estudo da solda dos conectores, conforme item 4.1.

A Tabela 4.22 apresenta os resultados obtidos para os ensaios que tiveram o rompimento devido a essa falha.

A ruptura da solda dos conectores do ensaio PO.11.r ocorreu no lado 1 da laje de concreto, que pode ser observado no grupo de extensômetros, ao atingir a carga de ruptura de 319,0 kN.

No gráfico da Figura 4.41 pode ser observado o comportamento Carga *versus* deformação específica do grupo de extensômetros g1, que se localiza conforme Figura 4.21 (b). Esse grupo apresenta os resultados ou comportamentos durante todo o ensaio sem a influência do concreto da laje, auxiliando na comparação de efeitos sobre a barra de armadura. O extensômetro 6, localizado em uma das barras do lado 1 e que teve o escoamento alcançado, indica a maior carga aplicada devido ao rompimento do conector nesse lado.

No gráfico apresentado na Figura 4.42 pode ser observado o comportamento força *versus* deformação específica do grupo de extensômetros g3, que se localiza na barra vertical número 1, com extensômetros internos e

externos a laje de concreto. Pode-se verificar o comportamento de escoamento do aço, com o ponto de ruptura, nos extensômetros 0 e 1, com início de escoamento entre as cargas 200 e 250 kN, onde ocorre um aumento na deformação específica com relação ao trecho inicial, indicando que as duas barras da laje 1 receberam solicitações similares entre si. Além disso, nota-se a diferença de comportamento das barras de aço envolvidas e não envolvidas por concreto, que apresentam curvas distintas com a aplicação das cargas.

Tabela 4.22 – Ruptura pela solda do conector – resultados.

Modelo	Força (kN)		Modo de ruptura	
	Prevista (EC)	Obtida	Previsto (EC)	Obtido
PO.11.r	402,1	319,0	Barra	Solda conector
PO.12.r	402,1	352,2	Barra	Solda conector
PO.21	713,4	253,7	Conector	Solda conector
PO.21.r	713,4	438,6	Do conector	Solda conector
PO.23.r	713,4	414,5	Do conector	Solda conector
PO.71.r	480,9	415,5	Ancoragem	Solda conector
PO.73.r	480,9	433,8	Ancoragem	Solda conector
PO.81.r	475,6	268,8	Do conector	Solda conector
PO.91	475,6	379,5	Conector	Solda conector
PO.93	475,6	307,5	Conector	Solda conector

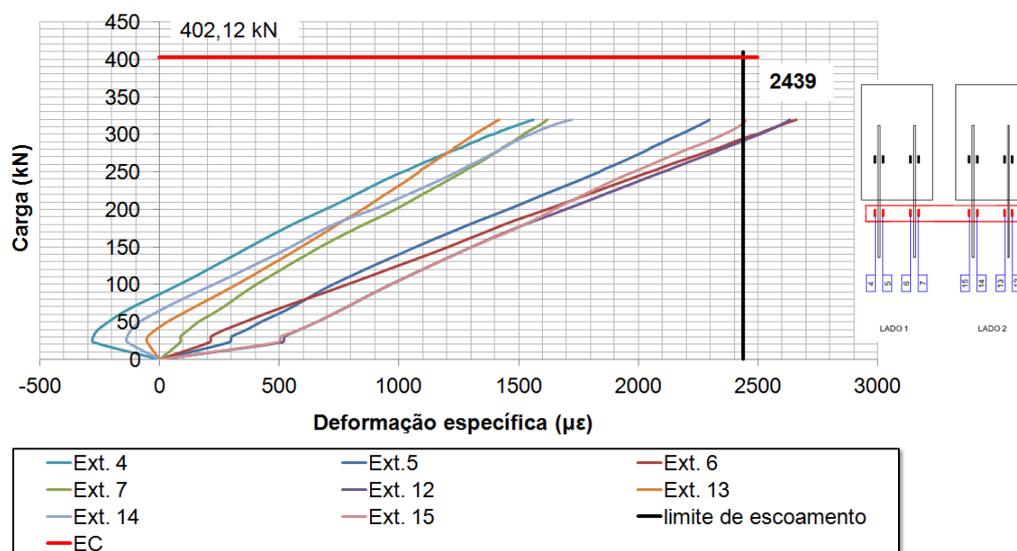


Figura 4.41 – Gráfico carga versus deformação específica – Ensaio PO.11.r, g1.

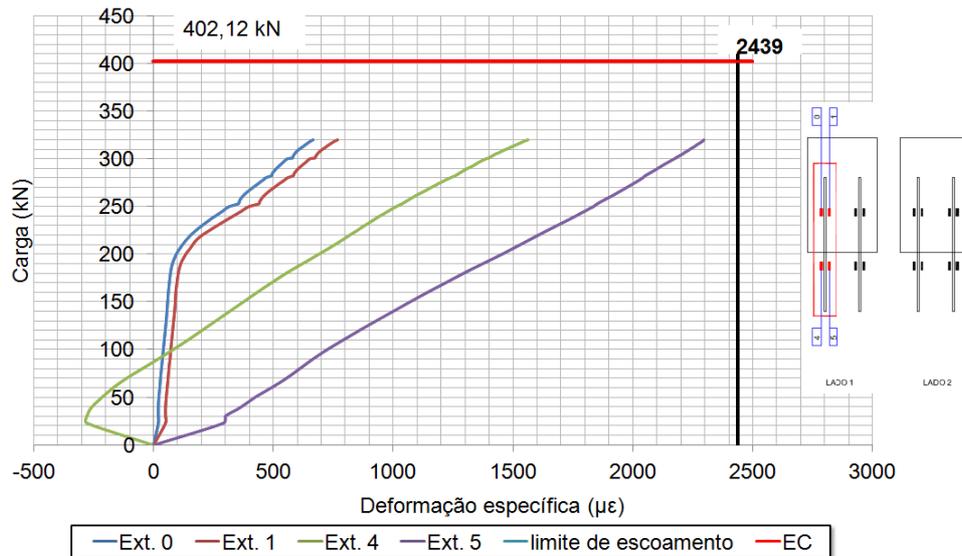


Figura 4.42 – Gráfico carga *versus* deformação específica – Ensaio PO.11.r, g3.

A Figura 4.43 mostra, para o ensaio PO.11.r, a curva carga *versus* deslocamento, e pelo comportamento do LVDT 8 é possível perceber o lado onde ocorreu a ruptura, devido ao seu deslocamento relativamente maior que o do no LVDT 7.

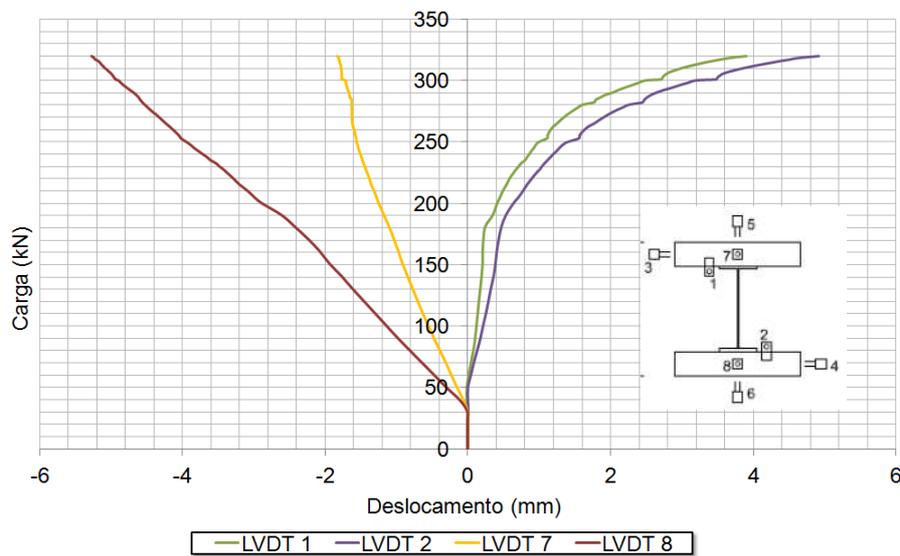


Figura 4.43 – Gráfico carga *versus* deslocamento, PO.11.r (LVDTs 1,2,7,8).

A Figura 4.44 apresenta a ruptura do ensaio PO.12.r, tendo ocorrido no lado 2, devido a ruptura da solda do conector, com uma carga igual a 352,2 kN. No gráfico apresentado na Figura 4.45 pode ser observado o comportamento da carga *versus* deformação específica do grupo de extensômetros g1, que se localiza na faixa horizontal fora da laje de concreto. Esse grupo apresenta o comportamento durante todo o ensaio realtivo exclusivamente ao aço da barra. Observa-se que o extensômetro. 7 indica o escoamento da barra de armadura acima do limite de escoamento do material, em uma carga máxima menor que a alcançada, indicando uma possível perda de resistência do conjunto.



Figura 4.44 – Ruptura do ensaio PO.12.r (Ramires, 2010).

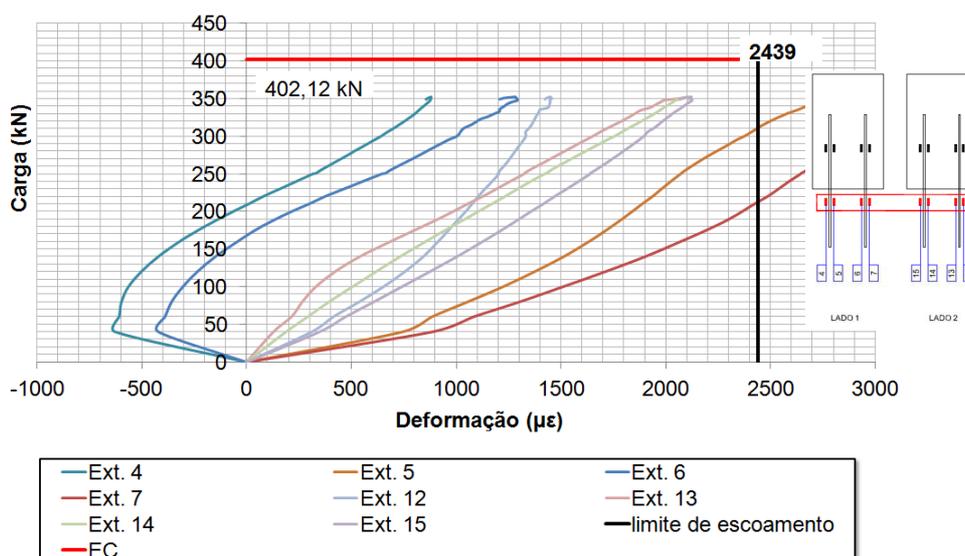


Figura 4.45 – Gráfico carga *versus* deformação específica - Ensaio PO.12.r, g1.

Para os deslocamentos, foi considerado o posicionamento apresentado na Figura 4.21. A Figura 4.46 apresenta a curva carga *versus* deslocamento dos transdutores de deslocamento (LVDTs) 1 e 2, 7 e 8. Observa-se que os conjuntos de transdutores obtiveram resultados semelhantes, indicando que não ocorreram rotações no conjunto, referentes à aplicação de cargas distintas em cada lado da laje de concreto.

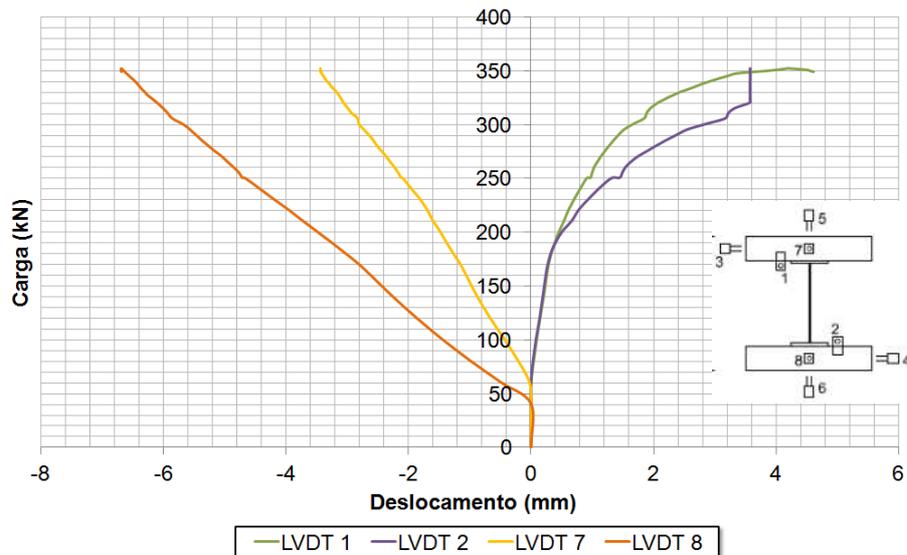


Figura 4.46 – Gráfico carga *versus* deslocamento – PO.12.r, LVDTs 1,2, 7, 8.

O ensaio PO.21 rompeu com o valor de 253,7 kN. A Figura 4.47 mostra dois momentos relativos a laje de concreto, conectores e perfil metálico, e a falta de aderência entre os elementos, ocorrendo o rompimento da solda do conector, fato inicialmente não previsto.

A Figura 4.78 apresenta os resultados para os ensaios PO.21 referente ao grupo de extensômetros g1, para o lado 1. Para facilitar a visualização dos resultados, uma vez que os mesmos foram bem inferiores ao previsto, foram retiradas da comparação os valores previstos e a deformação específica máxima elástica.

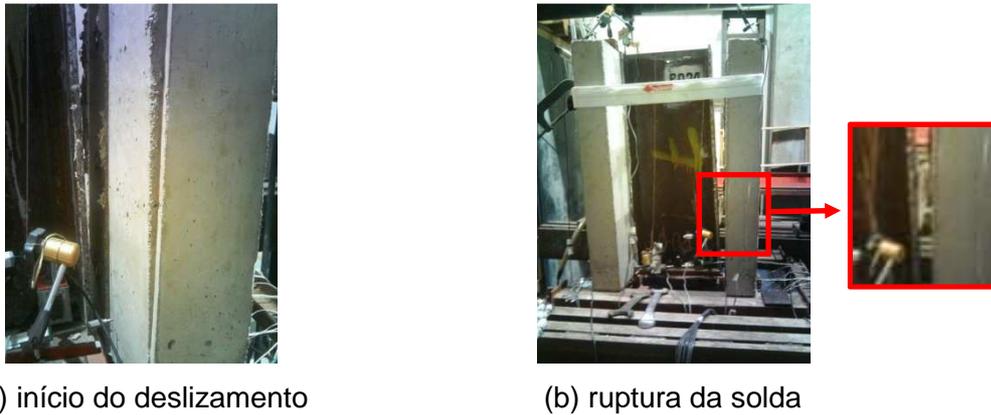


Figura 4.47 – Rompimento da solda do conector - PO.21.

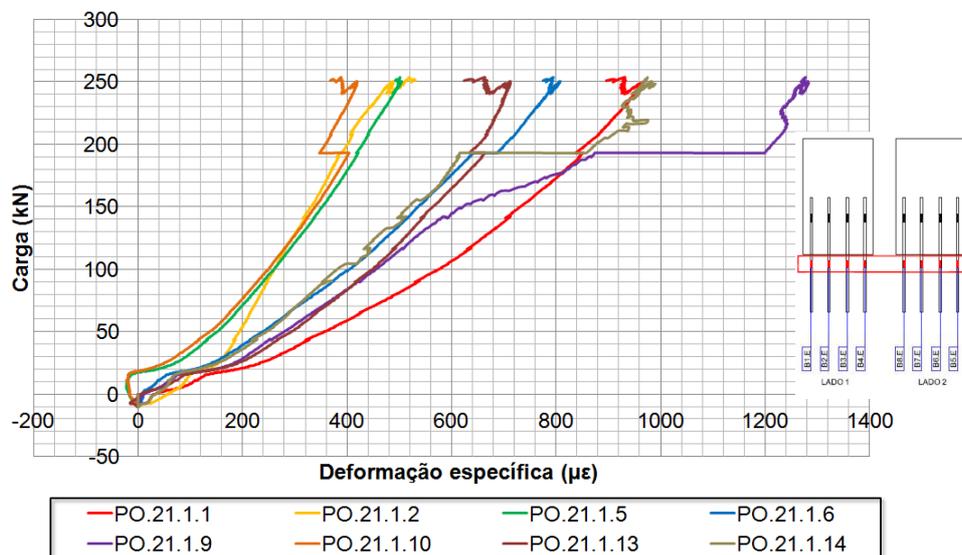


Figura 4.48 – Gráfico carga versus deformação específica - Ensaio PO.21, g1 - lado 1.

Comparando os resultados obtidos para a célula de carga principal e das células de carga secundárias, observa-se que o valor da célula principal foi de 253,7 kN e da secundária 335,8 kN. As células secundárias, quando comparadas entre si (CS1, CS2, CS3 E CS4) apresentam equilíbrio entre as aplicações de carga.

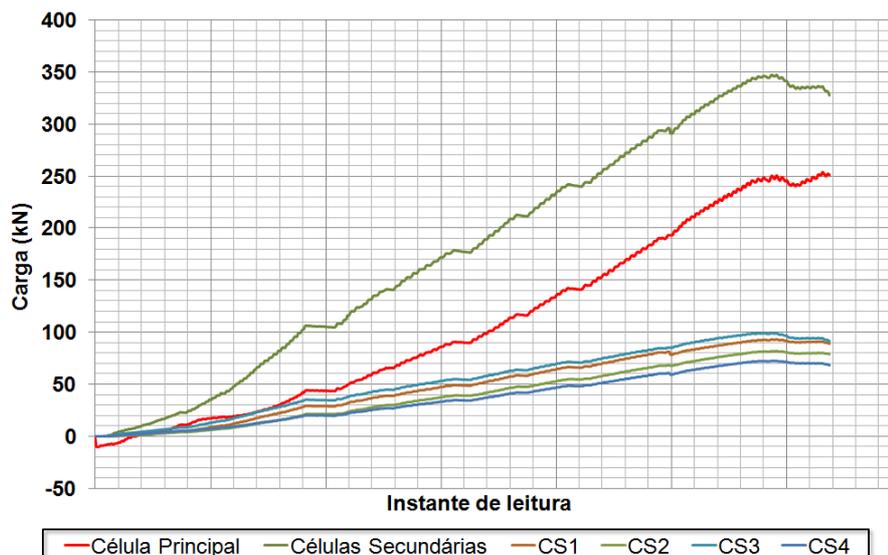


Figura 4.49 – Gráfico carga versus instante de leitura – Ensaio PO.21 – células de carga.

Os ensaios PO.21.r e PO.23.r alcançaram as cargas de 438,6 kN e 414,5 kN, respectivamente, quando ocorreu a ruptura da solda conector. No ensaio PO.21.r, o colapso ocorreu no lado 1 da laje de concreto. Pode-se verificar que em relação aos ensaios do grupo PO.1X.r, o grupo PO.2X.r apresentou menor resistência inicial com relação aos ensaios de menor número de barras, devido a menor necessidade de acomodação de toda a estrutura e uma melhor distribuição das solicitações. Na Figura 4.50 pode ser observado o comportamento carga versus deformação específica do grupo de extensômetro g7. É possível identificar os extensômetros que estão imersos no concreto e quais estão no lado externo a laje, com valores de deformação específica inferiores nos extensômetros internos.

A Figura 4.51 apresenta a curva carga versus deslocamento dos transdutores de deslocamento (LVDTs) 1 e 2, 7 e 8 para o ensaio PO.21.r. Os resultados trazem a informação de um possível desalinhamento da estrutura, ocasionado pela influência de carga maior em um lado que no outro da laje de concreto, devido a diferença de valores obtidos entre os LVDTs 7 e 8.

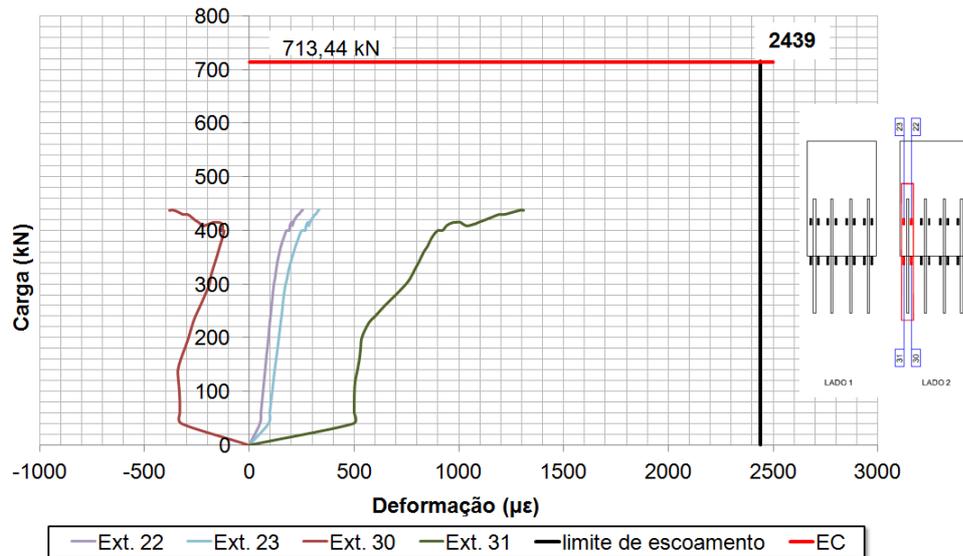


Figura 4.50 – Gráfico carga *versus* deformação específica – Ensaio PO.21.r, g7.

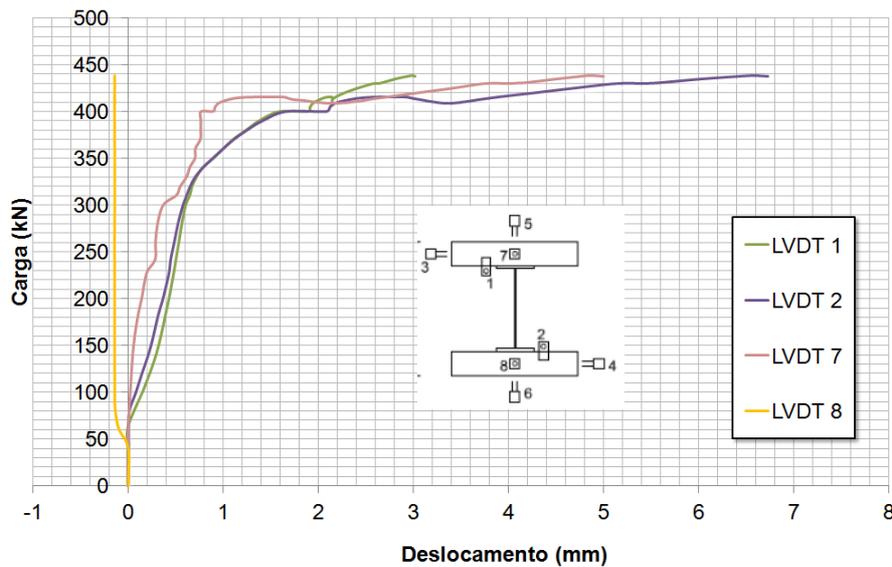


Figura 4.51 – Gráfico carga *versus* deslocamento - Ensaio PO.21.r, LVDTs 1,2,7,8.

O ensaio PO.23.r teve o colapso no lado 2. No gráfico apresentado pela Figura 4.52 pode ser observado o comportamento carga *versus* deformação específica do grupo de extensômetros g3 que se localizam ao longo da barra vertical 1, no lado 1. Observa-se que para esse conjunto os resultados obtidos são semelhantes, indicando que a maior sollicitação não ocorreu no lado 1 da laje de concreto.

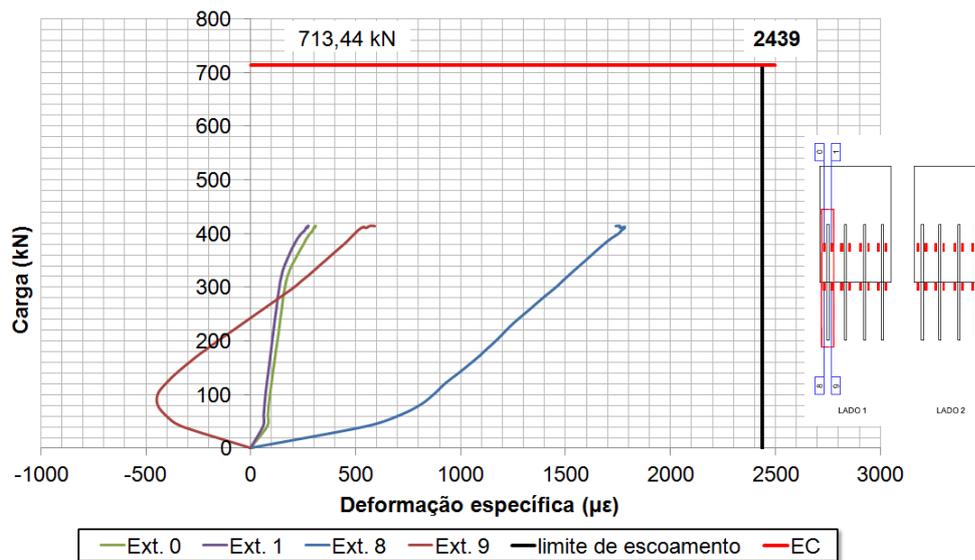


Figura 4.52 – Gráfico carga *versus* deformação específica – Ensaio PO.23.r, g3.

A Figura 4.53 apresenta o gráfico carga *versus* deslocamento dos transdutores de deslocamento (LVDTs) 1 e 2, 7 e 8. O comportamento do LVDT 2 evidencia a ruptura do conector até atingir a ruptura da solda, devido a curva e a redução do aumento de carga. Os LVDTs 7 e 8 apresentam valores próximos, não indicando a rotação da estrutura.

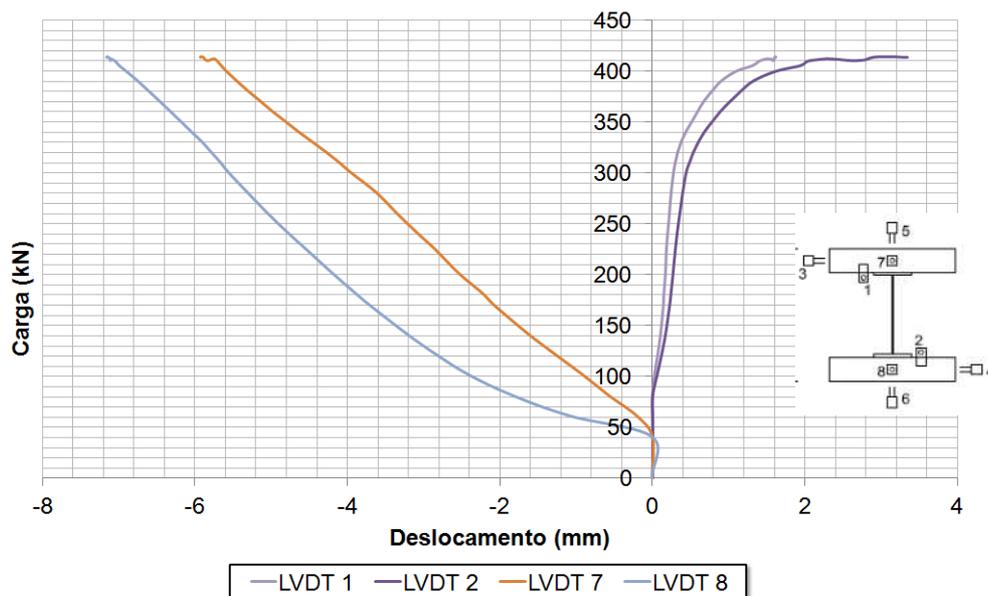


Figura 4.53 – Gráfico carga *versus* deslocamento – Ensaio PO.23.r, LVDTs 1,2,7,8.

O ensaio PO.71.r teve o colapso no lado 2 da laje de concreto. O gráfico da Figura 4.54 apresenta o comportamento carga *versus* deformação específica do grupo de extensômetros g1, que se localiza na faixa horizontal fora da laje de concreto. Foram descartados os valores obtidos pelo extensômetro 7, pois apresentaram valores superiores ao limite de escoamento desde o início de sua medição, indicando falha na instrumentação. Já o extensômetro 6 ultrapassa esse limite antes do final do teste, o que indica que os valores de carga naquela região eram superiores, devido a proximidade a barra da armadura e da solda do conector de cisalhamento.

A Figura 4.55 traz o gráfico carga *versus* deslocamento dos LVDTs 3 e 4, 5 e 6. Nota-se a diferença de comportamento entre os pares de transdutores que pode ter ocorrido devido a uma maior solicitação absorvido de um lado em relação ao outro da laje de concreto.

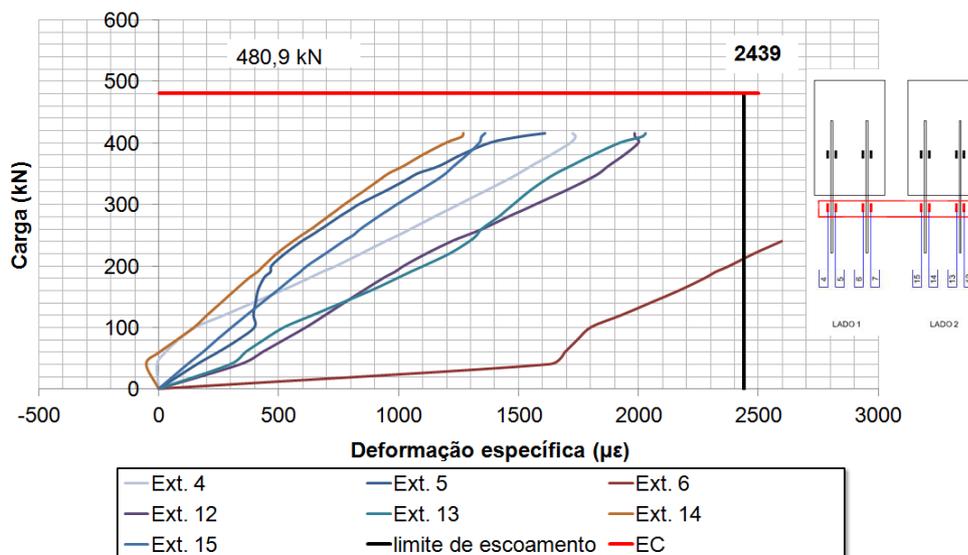


Figura 4.54 – Gráfico carga *versus* deformação específica – Ensaio PO.71.r, g1.

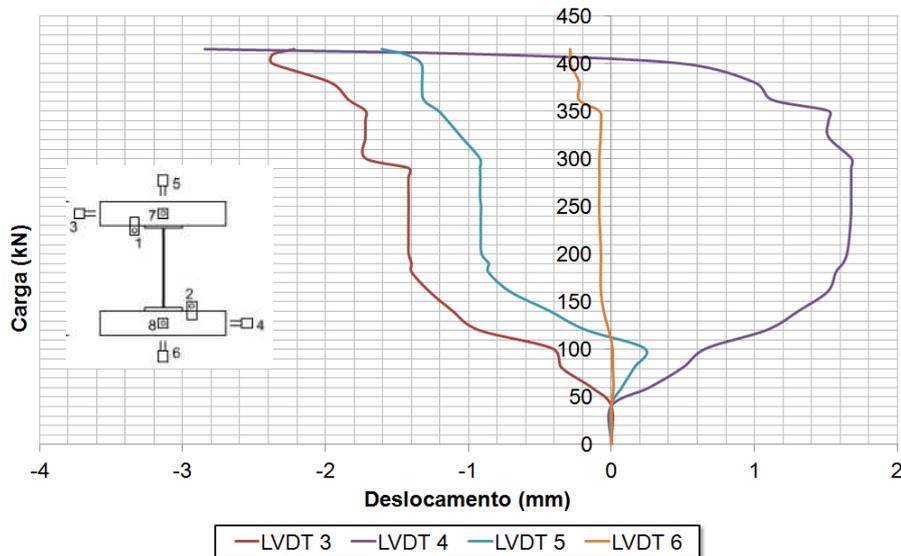


Figura 4.55 – Gráfico carga *versus* deslocamento – Ensaio PO.71.r, LVDTs 3,4,5,6.

O conector rompido no ensaio PO.73.r estava localizado no lado 2 da laje. Na Figura 4.56 pode ser observado o comportamento carga *versus* deformação específica do grupo de extensômetros g3, que se localizam na barra vertical número 1. Nota-se que o extensômetro 4 praticamente atingiu o limite de escoamento antes de ocorrer a ruptura da solda dos conectores de cisalhamento, e que é possível ver a formação do patamar de escoamento nos extensômetros 0 e 1.

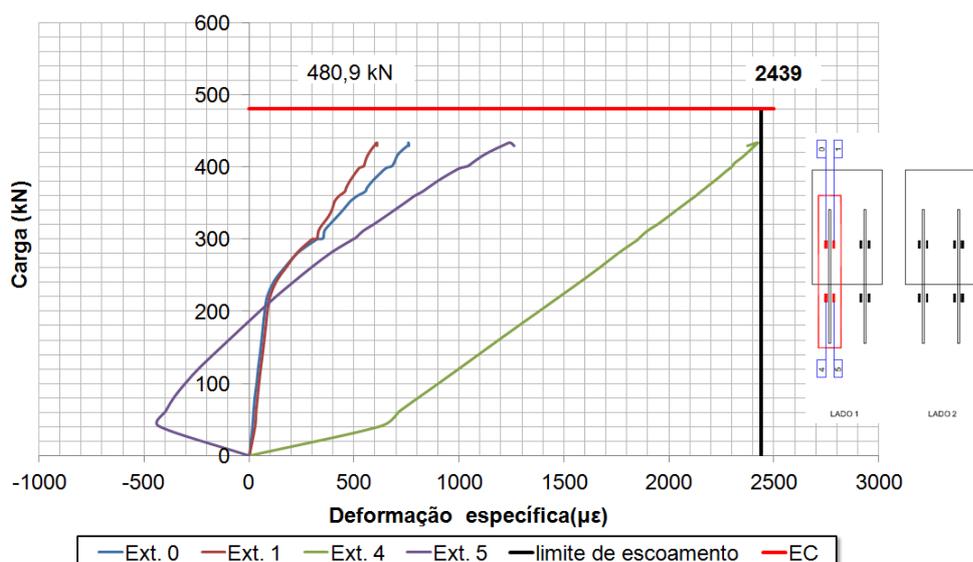


Figura 4.56 – Gráfico carga *versus* deformação específica - Ensaio PO.73.r, g3.

A Figura 4.57 apresenta a curva carga *versus* deslocamento dos transdutores de deslocamento 1 e 2, 7 e 8. Os LVDTs 1 e 2 retratam claramente os momentos onde ocorreram o rompimento dos conectores, em 300 kN, após 350 kN e 400 kN.

A Figura 4.58 apresenta a curva carga *versus* deslocamento dos LVDTs 3 e 4, 5 e 6. A partir da aproximação da ruptura da solda dos conectores ocorreu um deslizamento no LVDT 3. As medições dos LVDTs 5 e 6 foram distintas, indicando maior sollicitação em um dos lados da laje de concreto.

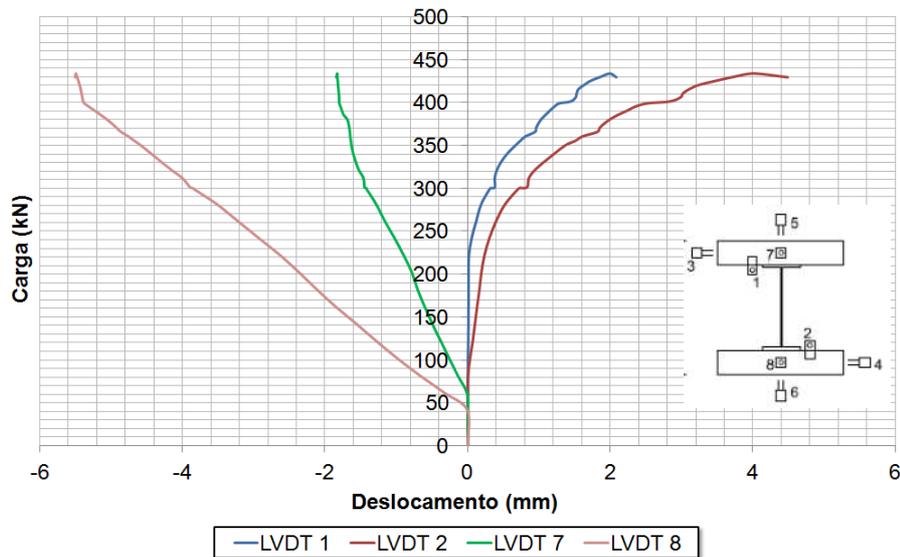


Figura 4.57 – Gráfico carga *versus* deslocamento - Ensaio PO.73.r, LVDTs 1,2,7,8.

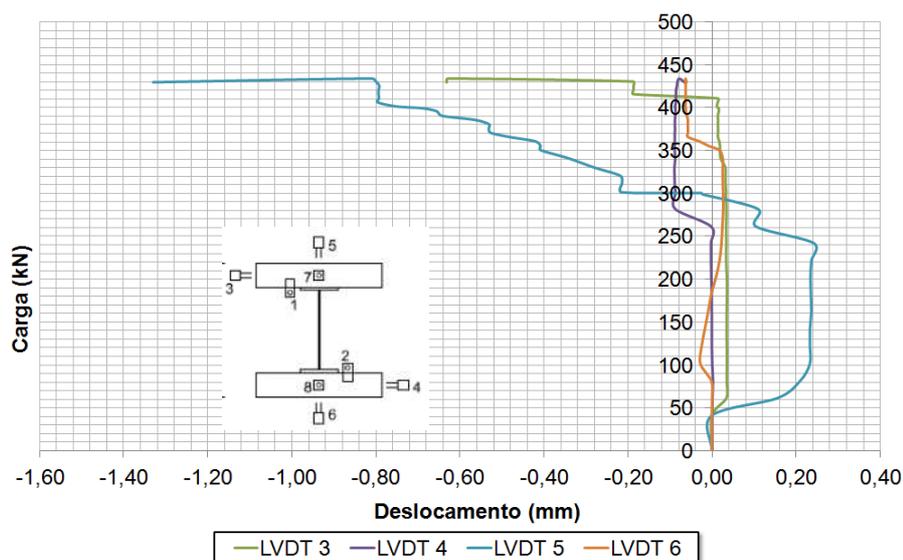
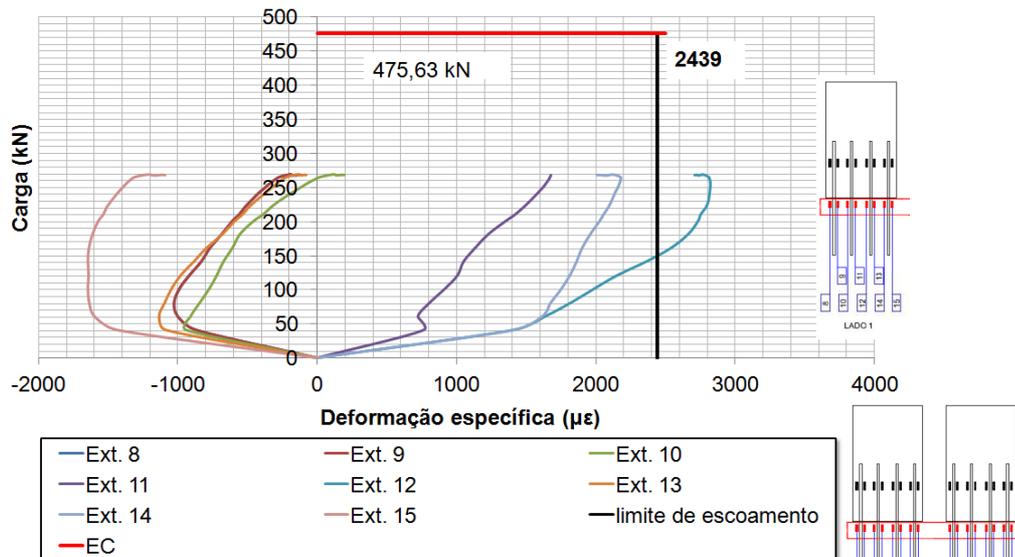
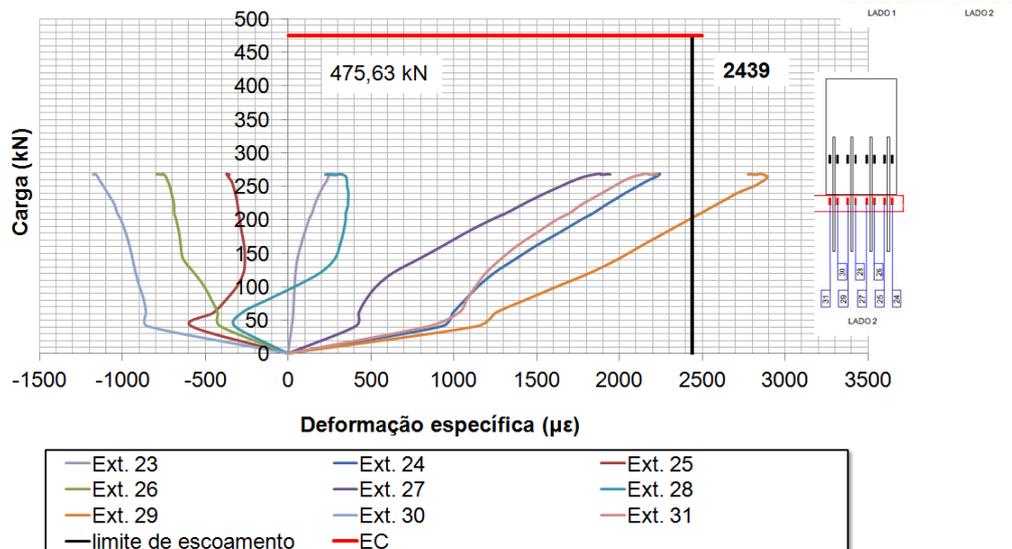


Figura 4.58 – Gráfico carga *versus* deslocamento - Ensaio PO.73.r, LVDTs 3,4,5,6.

O ensaio PO.81.r teve a ruptura no lado 1, com uma força igual a 268,8 kN. No gráfico apresentado na Figura 4.59 pode ser observado o comportamento carga *versus* deformação específica do grupo de extensômetros g1. Nota-se que antes de ocorrer a ruptura da solda dos conectores o extensômetro 12 já havia ultrapassado o limite de ruptura. Pode-se também observar que no lado 1 que os extensômetros 8 e 9 não apresentaram a deformação significativa ao longo do seu trajeto, sendo interpretado de modo que somente a solda do conector de cisalhamento deformou-se consideravelmente a partir desse ponto.



(a) g1 - Lado 1



(b) g1 - Lado 2

Figura 4.59 – Gráfico carga *versus* deformação específica – Ensaio PO.81.r, g1.

A Figura 4.60 apresenta a curva carga *versus* deslocamento dos LVDTs 3 e 4, 5 e 6. Nesse caso, o transdutor com maior deslocamento foi o LVDT 5, indicando uma inclinação do sistema para o lado 2 da laje de concreto.

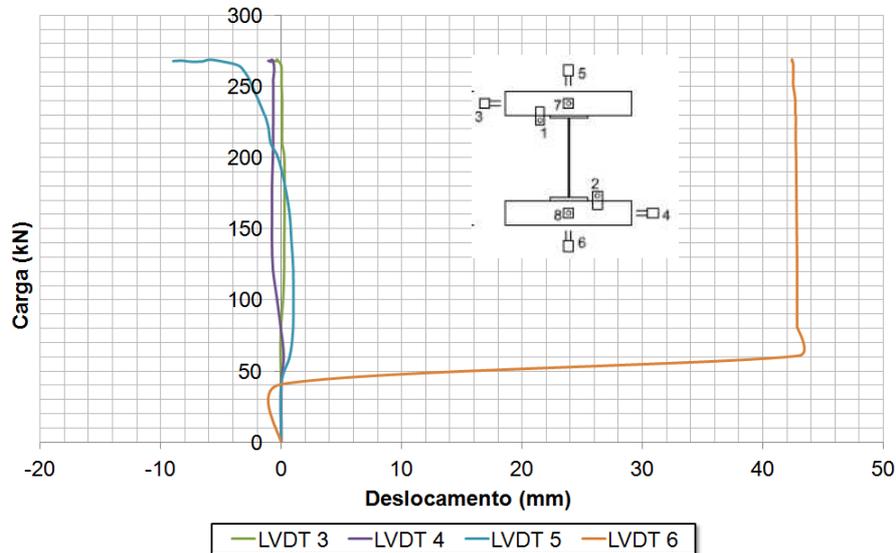


Figura 4.60 – Gráfico carga *versus* deslocamento – Ensaio PO.81.r, LVDTs 3,4,5,6.

Os ensaios PO.91 e PO.93 tinham como resultado esperado 475,6 kN, e atingiram 379,5 kN e 307,5 kN, para PO.91 e PO.93, respectivamente. A Figura 4.61 mostra dois momentos relativos a laje de concreto, conectores e perfil metálico, e a falta de aderência entre os elementos, para o ensaio PO.91. Observa-se assim, que o conector não foi capaz de manter a aderência entre os elementos, ocorrendo o rompimento da solda do conector, fato inicialmente não previsto. O mesmo ocorreu para o ensaio PO.93, apresentado na Figura 4.62.



(a) início do deslizamento



(b) ruptura da solda

Figura 4.61 – Rompimento da solda do conector – PO.91.



Figura 4.62 – Rompimento da solda do conector - PO.93.

A Figura 4.63 apresenta os resultados para os ensaios PO.91 referente ao grupo de extensômetros g3. Observa-se que os valores obtidos para a deformação específica para esse grupo permaneceram baixas. O mesmo pode ser verificado para esse grupo de extensômetros, para os ensaios PO.93, mostrado na Figura 4.64.

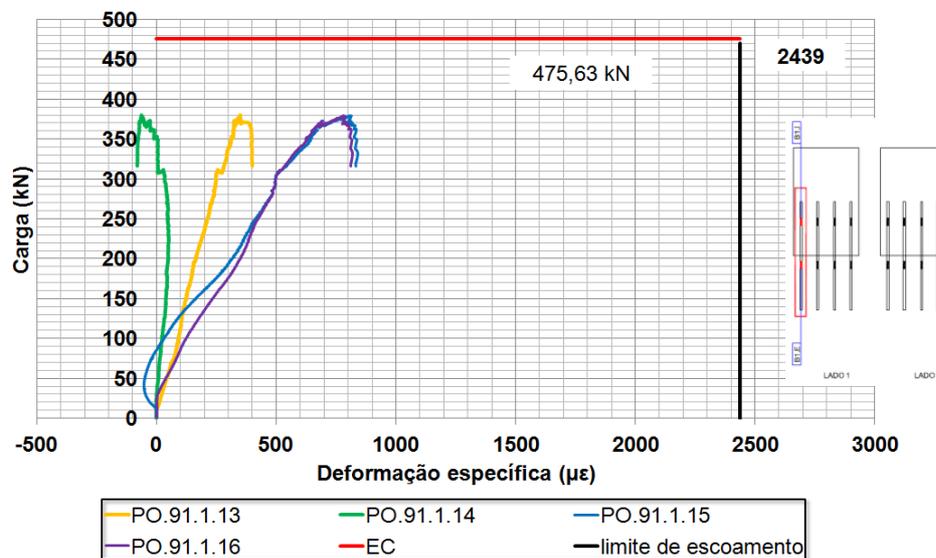


Figura 4.63 – Gráfico carga versus deformação específica - Ensaio PO.91, g3.

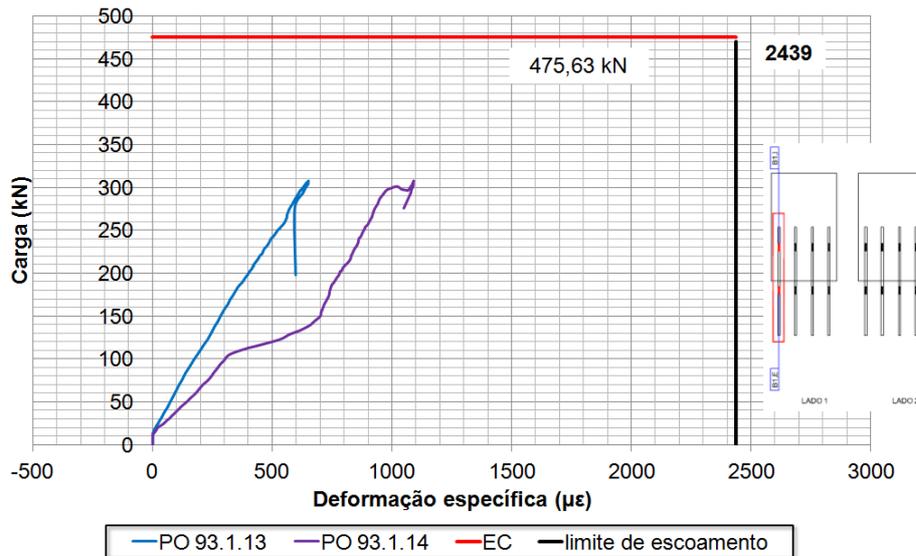


Figura 4.64 – Gráfico carga *versus* deformação específica - Ensaio PO.93, g3.

A Figura 4.65 apresenta a comparação dos valores obtidos para as células de carga principal, o somatório das secundárias e os valores individuais das últimas, para o ensaio PO.93. Destaca-se que os valores individuais só são representados para duas células, pois nesse ensaio houve um problema na gravação dos resultados e os valores obtidos para estas células não foram corretamente gravados. Percebe-se que os valores obtidos entre os conjuntos foram semelhantes, e também é verificado o equilíbrio entre as células secundárias.

Para o ensaio PO.91 não foi possível realizar essa comparação, uma vez que foram obtidas as cargas apenas pela medição da célula principal e pelo transdutor de pressão, esse último que não está sendo considerado para a comparação dos resultados.

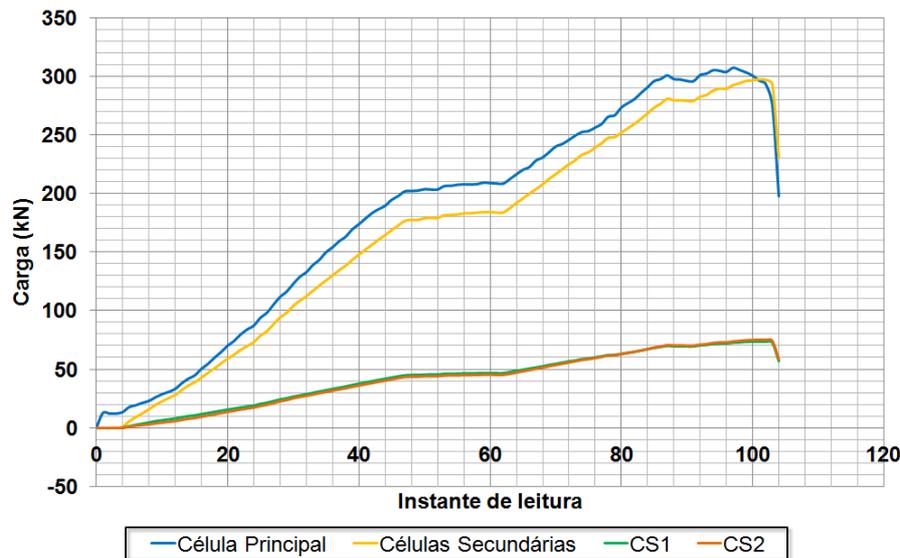


Figura 4.65 – Gráfico carga versus medições - Ensaio PO.93 - células de carga.

Observando os valores obtidos para os ensaios e apresentados no Apêndice A, pode-se citar como pontos relevantes:

- Comparando-se a carga total obtida pela célula de carga principal ao valor previsto para cada ensaio observou-se nos ensaios o valor obtido atingiu o valor previsto em: 79% para o PO.11.r; 88% para PO.12.r; 64% para PO.21; 61% para PO.21.r; 58% para PO.23.r; 81% para PO.71.r, 84% para PO.73.r; 57% para PO.81.r; 80% para PO.91; 65% para PO.93.
- Quando comparado o valor de carga por barra calculado pelas deformações o ensaio os valores obtidos corresponderam ao valor esperado em 79% para PO.11.r, 87% para PO.12.r; 166% para PO.21; 47% para PO.21.r; 151% para PO.23.r; 100% para PO.71.r e PO.91; 75% para PO.73.r; 65% para o ensaio PO.81.r; 36% para PO.93.
- Comparando os valores de tensão normal a prevista os valores obtidos foram de 79% para o ensaio PO.11.r, 87% para PO.12.r; 34% para PO.21; 47% para PO.21.r; 151% para PO.23.r; 100% para PO.71.r e PO.91; 75% para PO.73.r, 65% para PO.81.r; 36% para PO.93.
- A comparação da tensão de arrancamento do valor obtido ao prevista indica valores de 79% para o ensaio PO.11.r, 73% para o ensaio PO.12.r; 60% para o ensaio PO.21; 83% para o ensaio PO.21.r; 90%

para o ensaio PO.23.r; 123% para o ensaio PO.71.r; 85% para o ensaio PO.73.r; 110% para o ensaio PO.81.r; 171% para o ensaio PO.91; 60% para o ensaio PO.93.

- Analisando-se as solicitações aplicadas em cada laje de concreto observa-se que: equilíbrio de deformações para o ensaio PO.11.r, PO.21.r, PO.23.r e PO.73.r; nos ensaios PO.12.r e PO.21 maiores deformações no lado 2 que no lado 1, sendo superiores cerca de 50% e 17%, respectivamente; maiores deformações no lado 1 que no lado 2 para os ensaios PO.71.r, PO.81.r, PO.91 e PO.93, sendo 30%, 10%, 20% e 10%; barras mais carregadas no ensaio PO.23.r e PO.81.r que as demais, sendo 1, 4 e 6 para o primeiro e 3 e 6 para o segundo.

Com os resultados obtidos foi possível avaliar as solicitações aplicadas em cada ensaio. Esses valores são apresentados na Tabela 4.23, Tabela 4.24 e Tabela 4.25. Observa-se que para esse conjunto de ensaios os valores obtidos foram inferiores aos esperados. Isto ocorreu porque os elementos não atingiram seus limites de escoamento, já que os ensaios foram interrompidos antes, devido à ruptura da solda dos conectores.

Para os ensaios PO.71.r e PO.91 os valores foram aproximados aos previstos, indicando que caso não houvesse a ruptura da solda, os resultados finais não seriam tão superiores aos obtidos. Analisando-se os valores para tensão de arrancamento, observa-se que os valores obtidos encontram-se em um intervalo de 1,43 e 5,59 MPa. A Tabela 4.25 apresenta os valores obtidos das tensões por meio dos valores de deformação específica dos ensaios e a comparação aos valores previstos.

Com esse grupo de ensaios, a fim de avaliar as pernas previstas das soldas para os ensaios que tiveram sua ruptura devida a sua falha, foram apresentados estudos comparativos entre as pernas de solda conhecidas e os possíveis valores alcançados por esses ensaios. Este estudo foi apresentado no item 4.1.2.

Tabela 4.23 – Resultados obtidos para a ruptura da solda dos conectores – cargas (parte 1).

Ensaio	Deformação específica ($\mu\epsilon$)		Força (kN)	
			Total	
	Interna	Externa	Prevista	Obtida
PO.11.r	764,5	1930,0	402,10	319,00
PO.12.r	865,0	2112,0	402,10	352,20
PO.21	220,0	833,5	713,40	253,70
PO.21.r	471,0	1143,5	713,40	438,60
PO.23.r	488,0	1244,5	713,40	414,50
PO.71.r	809,0	4284,0	515,90	415,50
PO.73.r	758,5	1834,0	515,90	433,80
PO.81.r	1133,0	1586,0	475,60	268,80
PO.91	328,0	3610,0	475,60	379,50
PO.93	369,0	869,5	475,60	307,50

Tabela 4.24 – Resultados obtidos para a ruptura da solda dos conectores – cargas (parte 2).

Ensaio	Força (kN)					
	F/barra			F_barra		
	Prevista	Obtida	Obt/prev	Prevista	Obtida	Obt/prev
PO.11.r	100,53	79,75	0,79	100,53	79,55	0,79
PO.12.r	100,53	88,05	0,88	100,53	87,05	0,87
PO.21	89,18	31,71	0,36	157,08	53,68	0,34
PO.21.r	89,18	54,83	0,61	157,08	73,64	0,47
PO.23.r	89,18	51,81	0,58	157,08	80,15	0,51
PO.71.r	128,98	103,88	0,81	157,08	158,00	1,01
PO.73.r	128,98	108,45	0,84	157,08	118,11	0,75
PO.81.r	59,45	33,60	0,57	100,53	65,37	0,65
PO.91	59,45	47,44	0,80	100,53	101,50	1,01
PO.93	59,45	38,44	0,65	100,53	35,84	0,36

Tabela 4.25 – Resultados ruptura pela solda dos conectores – tensões.

Ensaio	Tensão normal (MPa)				Tensão arrancamento (MPa)			
	Célula	Def	Prev	Def/prev	Célula	Def	Prev	Def/prev
PO.11.r	396,64	395,65	500,00	0,79	2,44	2,43	3,08	0,79
PO.12.r	437,92	432,96	500,00	0,87	2,69	2,24	3,08	0,73
PO.21	100,94	170,87	500,00	0,34	1,01	1,71	2,84	0,60
PO.21.r	174,51	234,42	500,00	0,47	1,75	2,34	2,84	0,83
PO.23.r	164,92	255,12	500,00	0,51	1,65	2,55	2,84	0,90
PO.71.r	330,64	502,93	500,00	1,01	3,67	5,59	4,56	1,23
PO.73.r	345,21	375,97	500,00	0,75	3,84	3,87	4,56	0,85
PO.81.r	167,11	325,13	500,00	0,65	2,23	4,34	3,94	1,10
PO.91	235,93	504,82	500,00	1,01	1,89	4,04	2,37	1,71
PO.93	191,17	178,25	500,00	0,36	1,53	1,43	2,37	0,60

4.2.2.3.

Ruptura pelo rompimento da barra de armadura

Serão apresentados a seguir os resultados dos ensaios que tiveram o rompimento devido à ruptura da barra de armadura. A Tabela 4.26 apresenta os resultados obtidos para esses ensaios.

Os gráficos para o ensaio PO.0.1 já foram apresentados no item 4.2.2.1. O colapso ocorreu com carga de 513 kN, na barra de armadura de número 1, lado 1, sendo observado que o extensômetro 35 ultrapassou o limite de escoamento localizado no grupo de extensômetro g2, lado 2, na Figura 4.66. A Figura 4.67 apresenta os LVDTs 1,2,8,9 e 10 do ensaio PO0.1, onde o LVDT 10 apresenta um aumento de deslocamentos sem acréscimo de carga, indicando a proximidade da ruptura.

Com as modificações realizadas para o ensaio PO.11, se atingiu a força de 351,3 kN. A Figura 4.68 apresenta a evolução da formação dos cones de rompimento do concreto para o ensaio PO.11, existente devido ao deslizamento entre o aço e o concreto, indicando a possibilidade do rompimento por esse modo de ruptura. Porém, no transcorrer do ensaio, o primeiro modo de falha ocorreu devido ao rompimento da barra, conforme Figura 4.69.

A Figura 4.70 apresenta os resultados para os ensaios PO.11 referentes ao grupo de extensômetros g3. Observa-se que os extensômetros externos

indicam o atingimento do limite de escoamento para a barra, o que reforça a possibilidade de que a ruptura ocorresse nesse elemento.

A Figura 4.79 apresenta os deslocamentos relativos aos transdutores LVDTs 1 e 2, 7 e 8 do PO.11. Observa-se que apesar dos grandes deslocamentos apontados do LVDT 1, os conjuntos de transdutores tiveram curvas similares, indicando o equilíbrio do sistema.

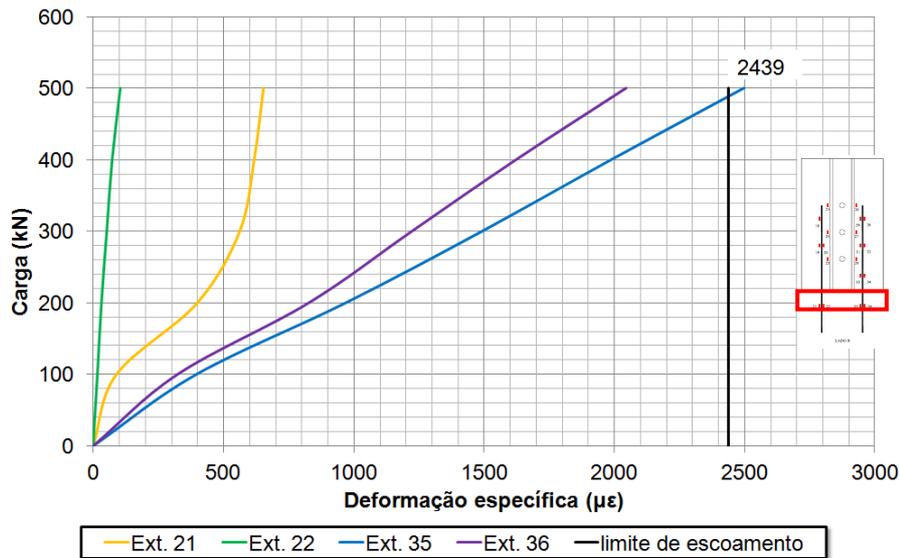


Figura 4.66 – Gráfico carga versus deformação específica – Ensaio PO.0.1, g2, lado 2.

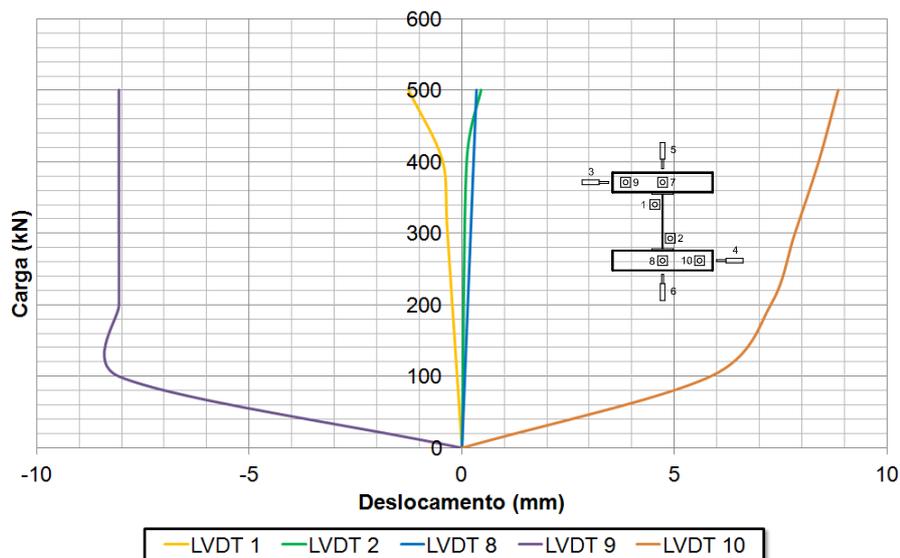


Figura 4.67 – Gráfico carga versus deslocamento – Ensaio PO.0.1, LVDTs 1,2,8,9 e 10.

Tabela 4.26 – Ruptura pelo rompimento da barra de armadura - resultados.

Modelo	Força (kN)		Modo de ruptura	
	Prevista _(EC)	Obtida	Previsto _(EC)	Obtido
PO.0.1	402,1	513,0	Barra	Barra 1
PO.11	402,1	351,3	Barra	Barra 3
PO.13.r	402,1	516,0	Barra	Barra 4



(a) instante 1



(b) instante 2

Figura 4.68 – Cone de rompimento do concreto – PO.11.**Figura 4.69 – Rompimento da barra – PO 11.**

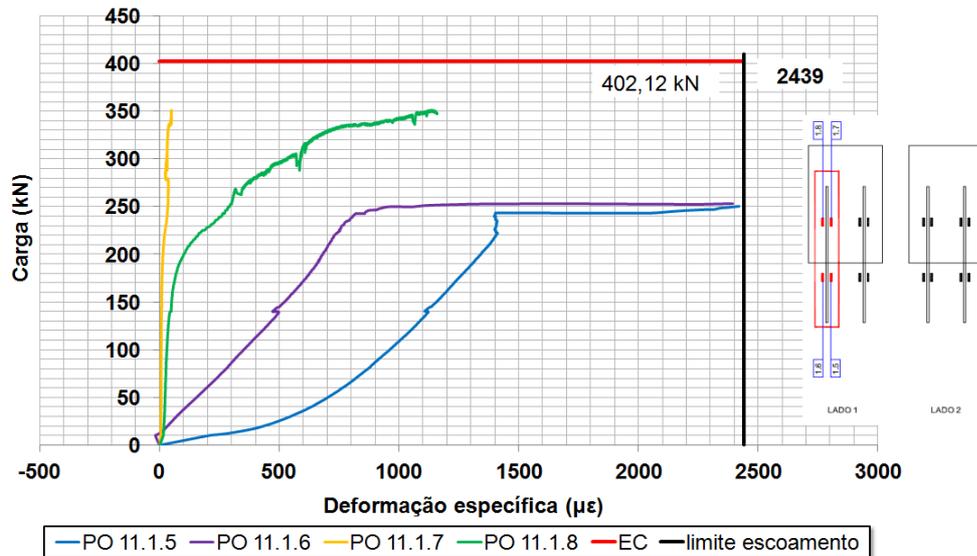


Figura 4.70 – Gráfico carga *versus* deformação específica – Ensaio PO.11, g3.

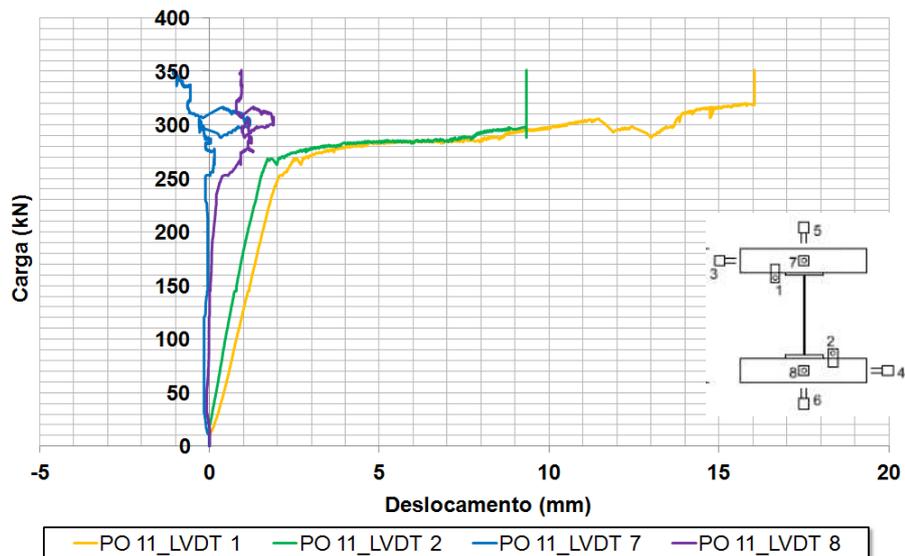


Figura 4.71 – Gráfico carga *versus* deslocamento – Ensaio PO.11, LVDTs 1,2,7,8.

Comparando-se os resultados entre as células de cargas principais e secundárias, observa-se que os valores obtidos são próximos, conforme Figura 4.72. O somatório das células de carga obteve valor de 422,6 kN e da célula principal foi de 351,3 kN, sendo assim superior.

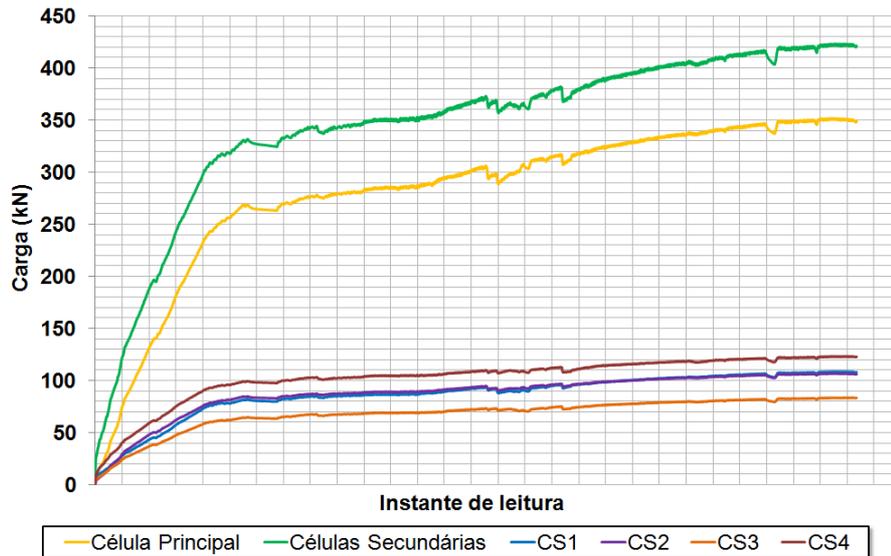


Figura 4.72 – Gráfico carga versus instante de leitura – Ensaio PO.11 – células de carga.

Após as modificações realizadas no ensaio PO.13.r, esse atingiu a ruptura com valor de 516,0 kN, conforme o modo de ruptura esperado, com a ruptura a tração da barra número 4 da armadura, localizada no lado 2. A Figura 4.73 apresenta essa ruptura.

O grupo de extensômetros g5 do PO.13.r mostrados na Figura 4.74, apresenta o comportamento da ruptura dessa barra, observando-se a ruptura da barra com o ext. 14, que ultrapassou o limite de escoamento do aço.



Figura 4.73 – Ruptura do ensaio PO.13.r (Ramires, 2010).

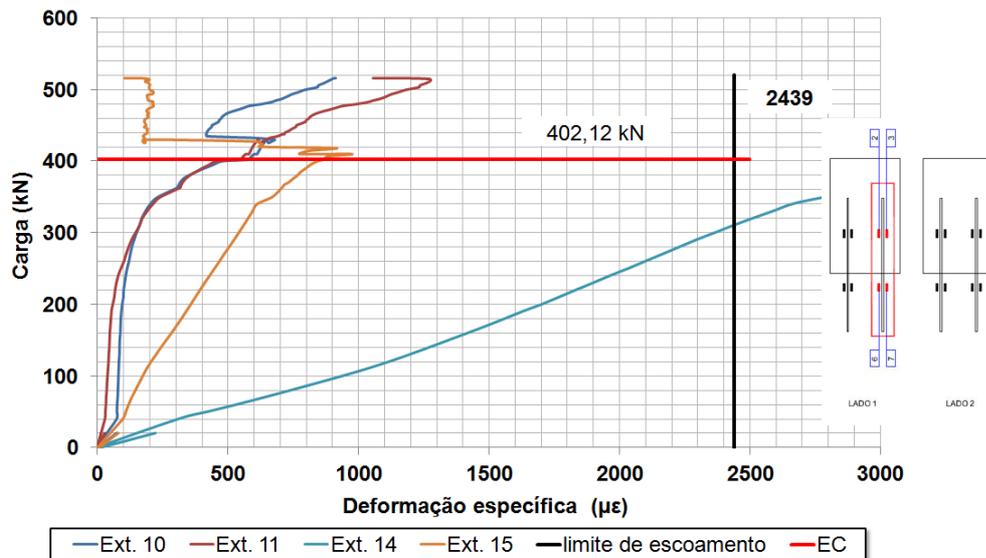


Figura 4.74 – Gráfico carga *versus* deformação específica – Ensaio PO.13.r, g5.

A Figura 4.75 apresenta a curva carga *versus* deslocamento dos LVDTs 1 e 2, 7 e 8. Os LVDTs 1 e 2 mostram resultados próximos entre si, indicando que não ocorreu deslizamento relativo entre a laje de concreto e o perfil metálico. Para os LVDTs 7 e 8, pode-se notar que ao atingir 400 kN o ensaio passou a ter maiores deslocamentos, caracterizando o possível escoamento.

A Figura 4.76 apresenta a curva carga *versus* deslocamento dos transdutores de deslocamento (LVDTs) 3 e 4, 5 e 6 do PO.13.r. Esses transdutores combinam os resultados obtidos das leituras dos deslocamentos horizontais, medidos nas duas direções de forma a monitorar a estabilidade da estrutura. Os resultados obtidos para os LVDTs 3 e 4 indicam valores opostos, sendo possível ter ocorrido rotação para um dos lados. Para os LVDTs 5 e 6 os valores obtidos foram próximos, que representam que nessa direção a rotação não ocorreu.

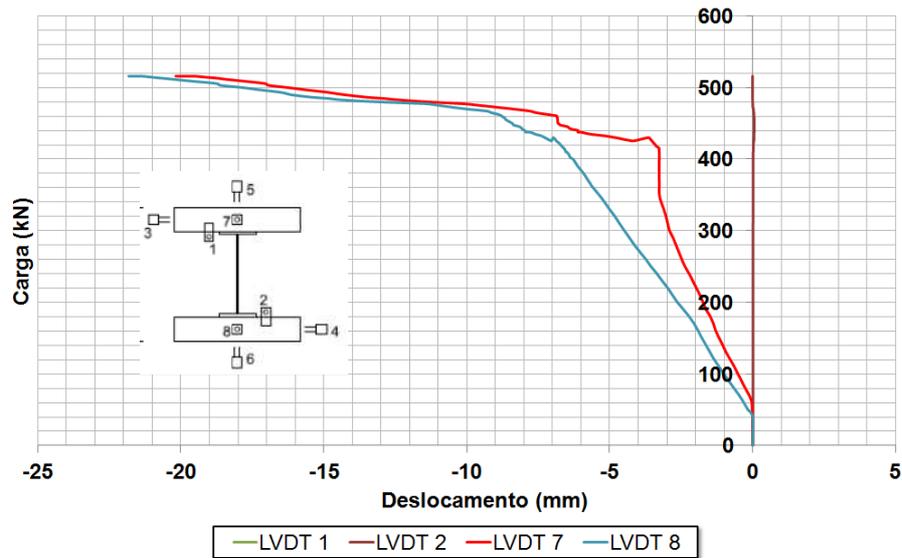


Figura 4.75 – Gráfico carga *versus* deslocamento – PO.13.r, LVDTs 1,2,7,8.

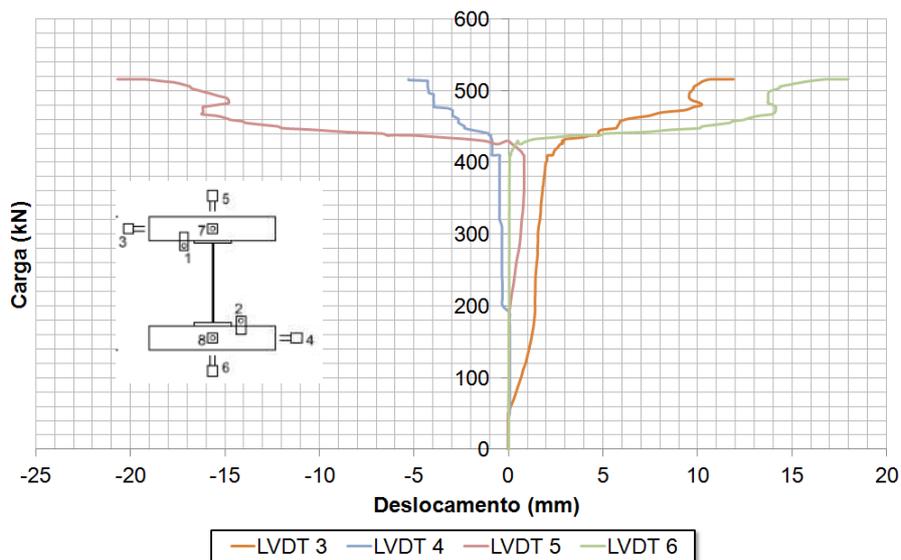


Figura 4.76 – Gráfico carga *versus* deslocamento – PO.13.r, LVDTs 3,4,5,6.

Dos resultados obtidos, descritos no Apêndice A, pode-se citar como pontos relevantes:

- Comparando-se a carga total da célula de carga principal ao valor previsto de carga máxima para cada ensaio, observou-se uma

diferença entre o valor previsto e o obtido de 33% o ensaio PO.0.1, 87% para o ensaio PO.11 e 28% para o ensaio PO.13.r.

- Quando comparado o valor de carga máxima por barra calculada pelas deformações, os valores obtidos corresponderam a 107% para o ensaio PO.0.1 e 100% para os ensaios PO.11 e PO.13.r.
- Comparando-se os valores de tensão normal e arrancamento com os valores previstos os valores obtidos foram de 104% para o ensaio PO.0.1 e 100% para os ensaios PO.11 e PO.13.r.
- Notou-se uma grande diferença de esforços nas barras para o ensaio PO.0.1, devido ao desequilíbrio entre os lados da laje de concreto analisando-se as solicitações aplicadas em cada laje de concreto; para o ensaio PO.11 há consistência entre o somatório de deformações entre os lados, porém ao se analisar cada lado separadamente, é possível verificar que no lado 2, os valores de cada barra são discrepantes; no ensaio PO.13.r o somatório de deformações entre os lados está consistente, porém a barra que apresenta menor deformação específica foi a que rompeu no ensaio.

Com os resultados obtidos foi possível avaliar as solicitações aplicadas em cada ensaio. Esses valores são apresentados na Tabela 4.27, Tabela 4.28 e Tabela 4.29. Observa-se que apenas para PO.0.1 os valores obtidos foram inferiores ao previsto, confirmando a ação do aço no conjunto. O ensaio PO.0.1 e PO.13.r apresentaram maiores diferenças com os resultados, indicando o rompimento do ensaio com valores superiores ao esperado. Dessa forma, pode-se confirmar a forma de atuação e previsão de cargas para os ensaios desenvolvidos.

Tabela 4.27 – Resultados obtidos para a ruptura da barra – forças (parte 1).

Ensaio	Deformação específica ($\mu\epsilon$)		Força (kN)	
			Total	
	Interna	Externa	Prevista	Obtida
PO.0.1	950,4	2271,2	402,10	535,00
PO.11	1255,0	8734,5	402,10	351,30
PO.13.r	954,0	5993,0	402,10	516,00

Tabela 4.28 – Resultados obtidos para a ruptura da barra - forças (parte 2).

Ensaio	Força (kN)					
	F/barra			F_barra		
	Prevista _(EC)	Obtida	Obt/prev	Prevista _(EC)	Obtida	Obt/prev
PO.0.1	100,53	133,75	1,33	100,53	93,61	0,93
PO.11	100,53	87,83	0,87	100,53	104,00	1,03
PO.13.r	100,53	129,00	1,28	100,53	103,00	1,02

Observa-se que a diferença entre os valores obtidos para tensão de arrancamento estão entre 2,87 e 3,18 MPa, indicando consistência dos resultados.

Tabela 4.29 – Resultados obtidos pela ruptura da barra – tensões.

Ensaio	Tensão normal (MPa)				Tensão arrancamento (MPa)			
	Célula	Def	Prev	Def/prev	Célula	Def	Prev	Def/prev
PO.0.1	665,22	465,59	500,00	0,93	4,09	2,87	3,08	0,93
PO.11	436,81	517,25	500,00	1,03	2,69	3,18	3,08	1,03
PO.13.r	641,59	512,28	500,00	1,02	3,95	3,15	3,08	1,02

4.2.2.4.

Ruptura pela ancoragem da barra de armadura

São apresentados a seguir os resultados dos ensaios que tiveram o rompimento devido à ancoragem da barra de armadura. A Tabela 4.30 apresenta esses resultados.

Para o ensaio PO.12, foi realizada a modificação do sistema, para evitar o rompimento inesperado do conector. Dessa forma, o ensaio PO.12 teve a ruptura devido a ancoragem da barra, com carga de 424,1 kN. A Figura 4.77 apresenta a ruptura da ancoragem da barra para o ensaio PO.12.

A Figura 4.78 apresenta os resultados para os ensaios PO.12 referente ao grupo de extensômetros g3. O extensômetro 6 não foi representado, pois sem valores foram desprezados. Observa-se que os extensômetros 5 e 7 foram solicitados até o limite de escoamento do aço.

Tabela 4.30 – Ruptura pela ancoragem da barra de armadura – resultados.

Modelo	Força (kN)		Modo de ruptura	
	Prevista _(EC)	Obtida	Previsto _(EC)	Obtido
PO.12	596,2	424,1	Barra	Ancoragem Barra 2
PO.22	1146,5	890,9	Ancoragem	Ancoragem Barra 8
PO.72.r	515,9	450,5	Ancoragem	Ancoragem Barra 2
PO.81	550,3	547,7	Ancoragem	Ancoragem Barra 2
PO.82.r	550,3	474,8	Do conector	Ancoragem Barra 2
PO.83.r	550,3	445,9	Do conector	Ancoragem Barra 6



Figura 4.77 – Rompimento da ancoragem – PO.12.

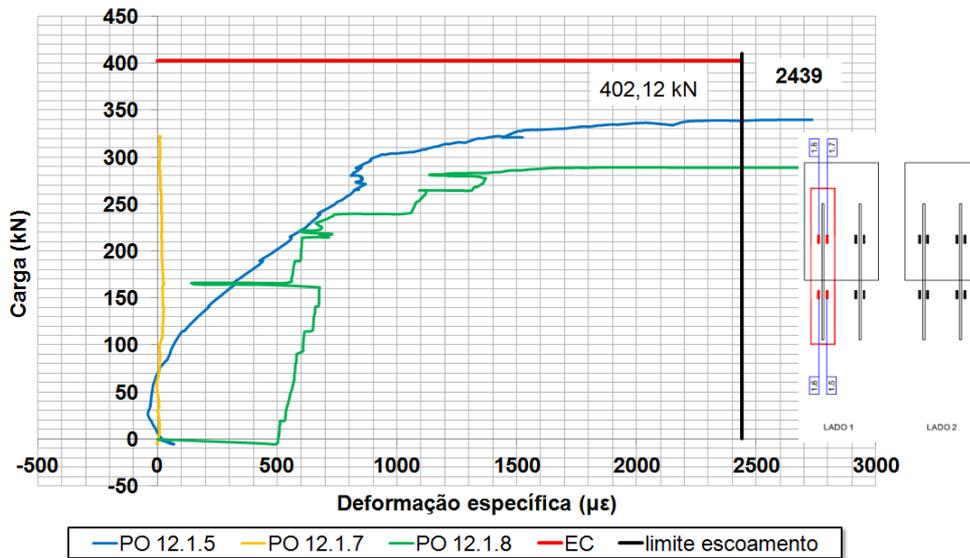


Figura 4.78 – Gráfico carga versus deformação específica – Ensaio PO.12, g3.

A Figura 4.79 apresenta os deslocamentos relativos aos transdutores LVDTs 1 e 2, 7 e 8. Observam-se deslocamentos similares entre os ensaios, indicando o equilíbrio do sistema.

A Figura 4.80 apresenta os resultados obtidos para as células de carga principal e secundárias. Observa-se que também para esses ensaios os valores da célula de carga foram próximos, e que existe equilíbrio entre as cargas obtidas para as células secundárias individuais.

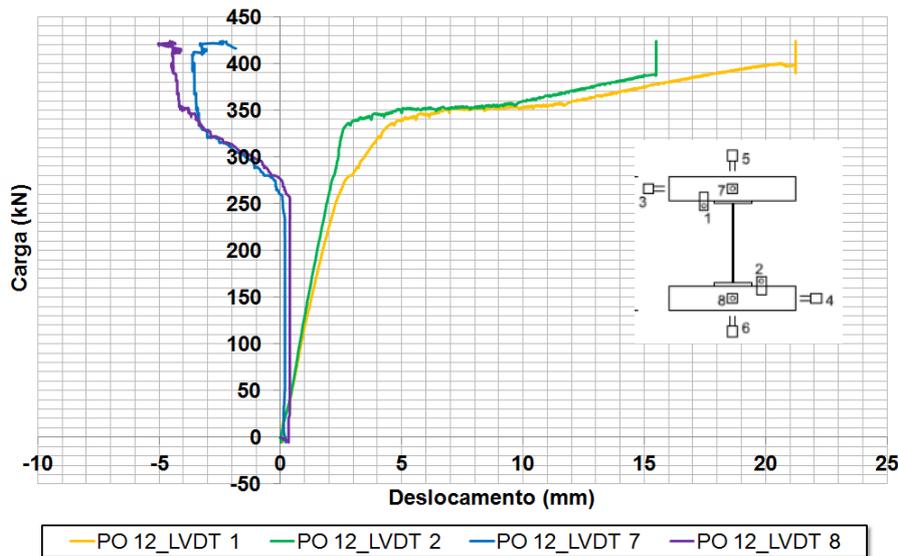


Figura 4.79 – Gráfico carga *versus* deslocamento – Ensaio PO.12, LVDTs 1,2,7,8.

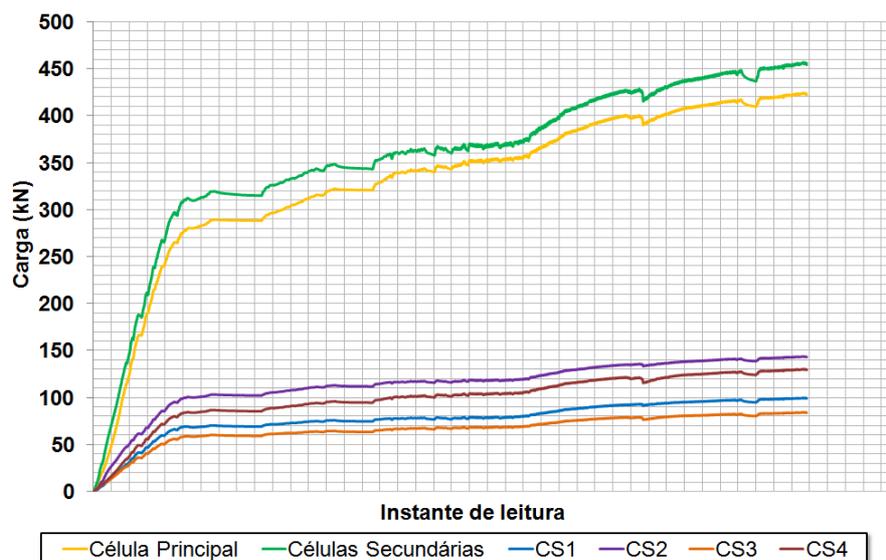


Figura 4.80 – Gráfico carga *versus* instante de leitura – Ensaio PO.12 - células de carga.

O ensaio PO.22, que com a modificação passou a ter o valor esperado de ruptura de 1146,5 kN, referente a falha devido a ancoragem da barra, atingiu o valor de 890,9 kN, com a falha prevista. A Figura 4.81 apresenta as fases da formação dos cones de rompimento do concreto para o ensaio PO.22, existente devido ao deslizamento entre o aço e o concreto, o que culminou com o rompimento da barra.

A Figura 4.82 apresenta os resultados para os ensaios PO.22 referente ao grupo de extensômetros g1, para o lado 1. Observa-se que os valores obtidos foram inferiores aos esperados, com as curvas apontando o acréscimo de força até o ponto do escoamento.

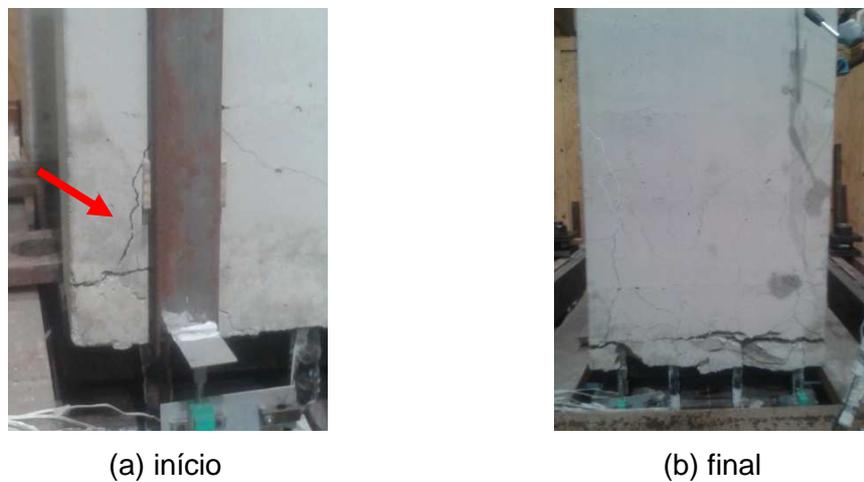


Figura 4.81 – Formação do cone de concreto – PO.22.

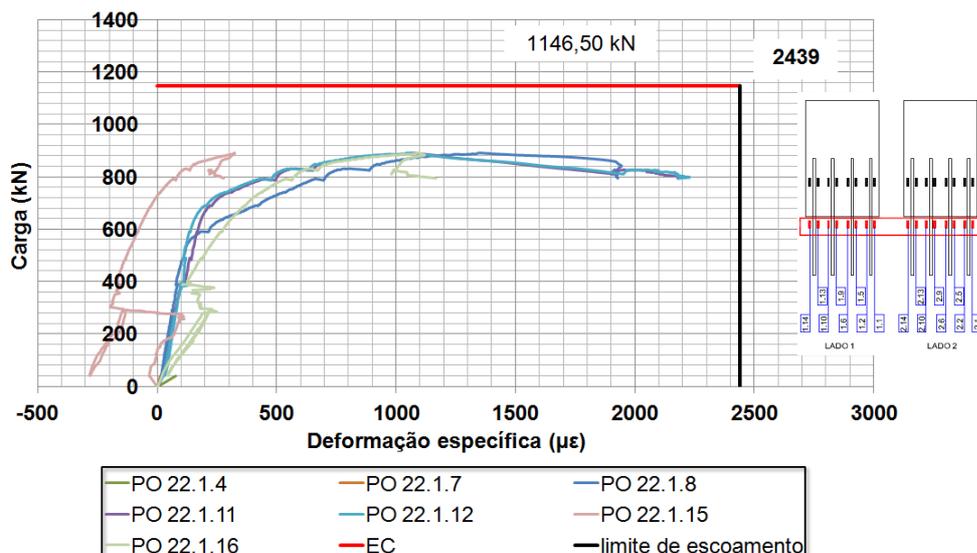


Figura 4.82 – Gráfico carga *versus* deformação específica – Ensaio PO.22, g1.

A Figura 4.83 apresenta a comparação entre os valores obtidos para as células de carga principal, secundárias e os extensômetros localizados em cada uma das barras redondas. Observa-se que os resultados apresentados incluem uma fase de carregamento e descarregamento dos sistema, para posterior sequência de execução do ensaio até sua ruptura.

Verificando-se os valores individuais de cada célula de carga secundária e dos extensômetros localizados nas barras redondas é possível verificar que possuem valores próximos e equilibrados. Com isso, o somatório de cada conjunto também apresenta valores próximos entre si. Com os valores individuais é possível confirmar que a calibração realizada está dentro dos limites de tolerância, uma vez que os resultados obtidos são semelhantes.

Comparando-se ao valor obtido para a célula de carga principal, percebe-se que esse atingiu valores distintos aos demais elementos, sendo inferior.

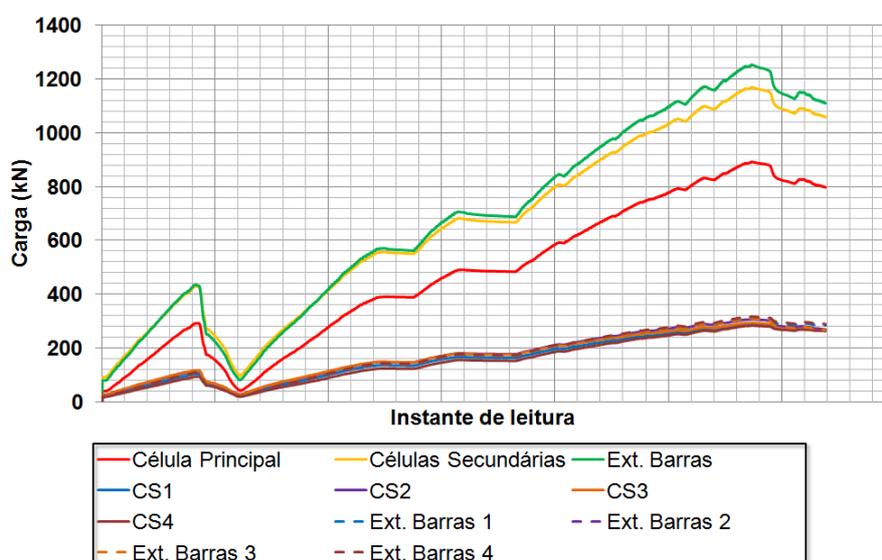


Figura 4.83 – Gráfico carga versus instante de leitura – Ensaio PO.22 – células de carga.

O ensaio PO.72.r atingiu o modo de ruptura esperado, com carga máxima de 448,6 kN. A Figura 4.84 mostra a ruptura do ensaio PO.72.r devido à ancoragem da barra da armadura 2, localizada no lado 1 da laje de concreto. No gráfico da Figura 4.85 pode ser observado o comportamento carga versus deformação específica do grupo de extensômetros g1, que se localiza na faixa horizontal fora da laje de concreto. Foram descartados os dados do extensômetro 6, por terem sido superiores aos valores do escoamento. O extensômetro 14 atingiu o escoamento ao final do ensaio, com os valores

obtidos similares entre os extensômetros, indicando cargas máximas próximas entre as barras.



Figura 4.84 – Ruptura da ancoragem no ensaio PO.72.r (Ramires, 2010).

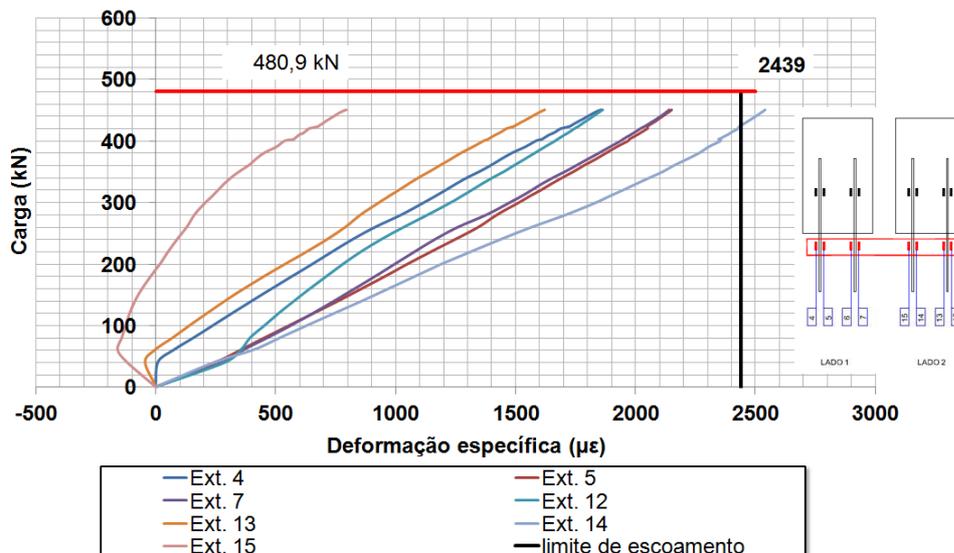


Figura 4.85 – Gráfico carga *versus* deformação específica – Ensaio PO.72.r, g1.

A Figura 4.86 apresenta a curva carga *versus* deslocamento dos LVDTs 3 e 4, 5 e 6 para PO.72.r. Em todos os gráficos de deslocamento desse ensaio, pode ser observado que a partir de 200 kN, o comportamento do gráfico é alterado, e que segue até a ruptura da ancoragem, sendo representado por saltos de valor, com aumento de deslocamento sem acréscimo de carga, característica da ruptura brusca.

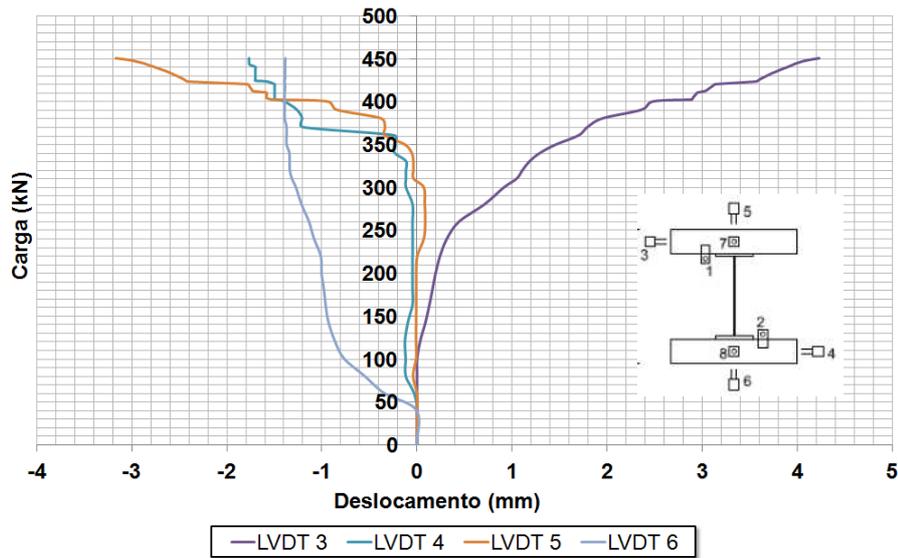


Figura 4.86 – Gráfico carga *versus* deslocamento - Ensaio PO.72.r, LVDTs 3,4,5,6.

O ensaio PO.81 alcançou o valor de ruptura de 547,7 kN, devido a ruptura da ancoragem, conforme previsto. A Figura 4.87 mostra a evolução dos cones de rompimento para o ensaio, que culminou na ruptura da ancoragem.



(a) início



(b) final

Figura 4.87 – Formação do cone de concreto - PO.81.

A Figura 4.88 apresenta os resultados para o ensaio PO.81 referente ao grupo de extensômetros g2, para o lado 2. Observa-se que os valores de deformação específica obtidos para as barras foram semelhantes, com valores levemente superiores para o caso da barra 3.

Observando-se a Figura 4.89, verificou-se as comparações com as diferentes formas de medição de força do ensaio, que nesse caso, pode contar com os valores da células de carga principal e secundárias, bem como os extensômetros localizados na barra redonda da estrutura auxiliar.

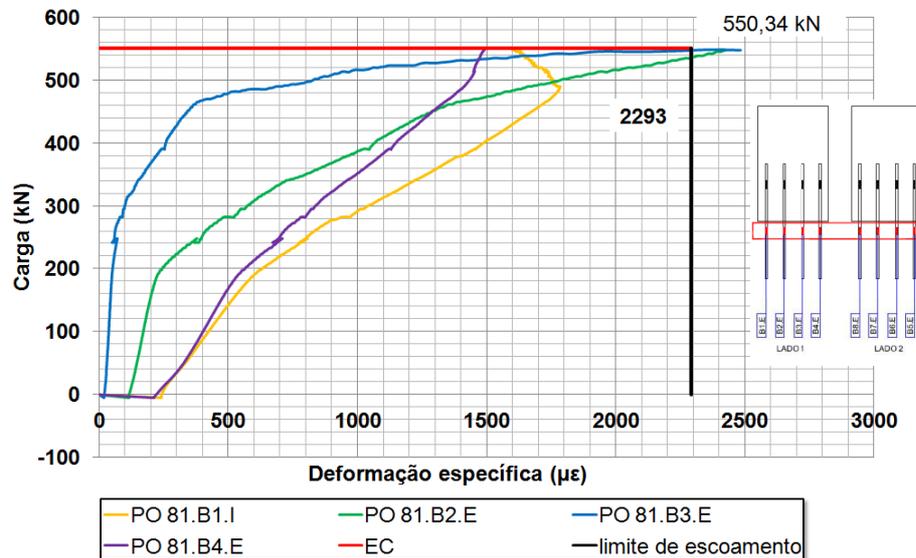


Figura 4.88 – Gráfico carga *versus* deformação específica – Ensaio PO.81, g2 lado 2.

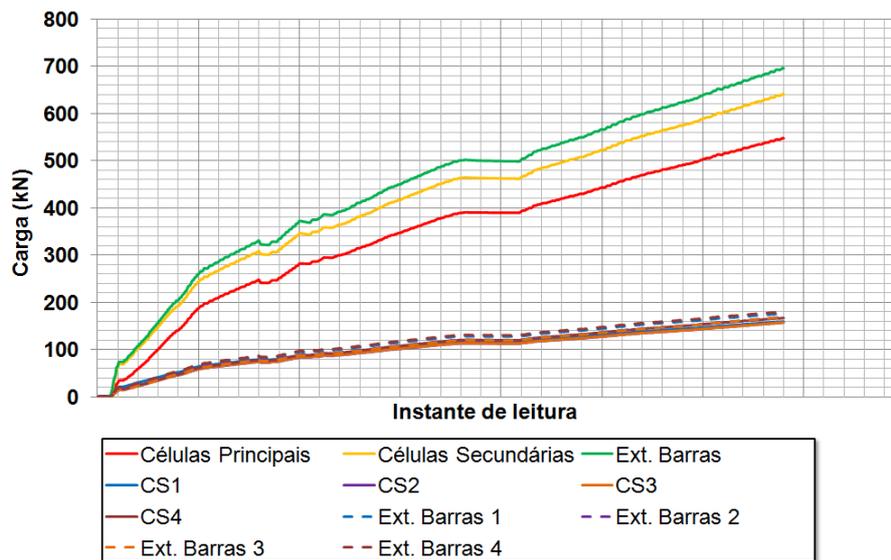


Figura 4.89 – Gráfico carga *versus* instante de leitura – Ensaio PO.81 – células de carga.

Os valores totais obtidos para as células secundárias e extensômetros nas barras redondas foram mais próximos que o valor obtido pela célula principal. Quando comparados individualmente os valores das células secundárias e extensômetros observa-se o equilíbrio de forças apresentadas, com valores semelhantes.

A Figura 4.90 apresenta a ruptura ocorrida para o ensaio PO.82.r e a Figura 4.91 para o ensaio PO.83.r.

O ensaio PO.82.r teve alterações na sua configuração atingindo o colapso na ancoragem da barra 2, no lado 1 do ensaio. No gráfico da Figura 4.92 observa-se o comportamento carga *versus* deformação específica do grupo de extensômetro g3 localizado na barra na laje de concreto. Nota-se uma maior deformação específica interna, indicando maior sollicitação sobre o concreto e a ancoragem do sistema.



Figura 4.90 – Ruptura da ancoragem da barra de armadura do ensaio PO.82.r (Ramires, 2010).



Figura 4.91 – Ruptura da ancoragem da barra de armadura do ensaio PO.83.r (Ramires, 2010).

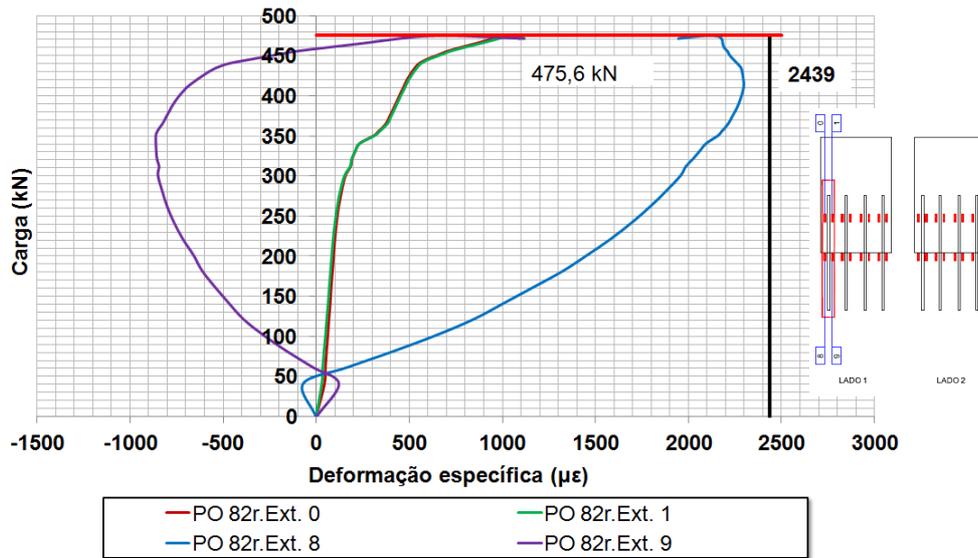


Figura 4.92 – Gráfico carga *versus* deformação específica – Ensaio PO.82.r, g3.

A Figura 4.93 apresenta a curva carga *versus* deslocamento dos LVDTs 3 e 4, 5 e 6 para o PO.82.r. Observa-se o maior deslocamento do LVDT 3, localizado no lado 1 da laje de concreto, confirmando-se o lado do rompimento do ensaio.

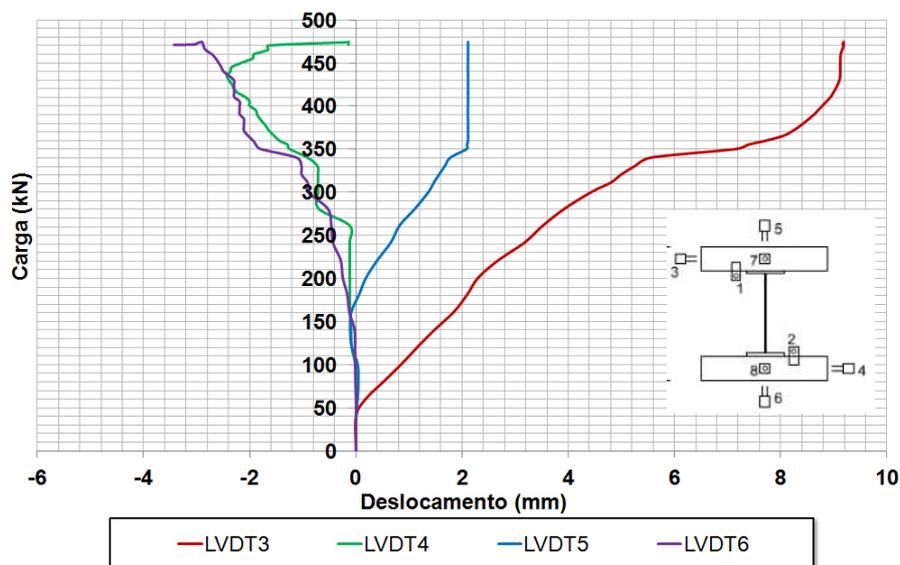


Figura 4.93 – Gráfico carga *versus* deslocamento – Ensaio PO.82.r, LVDTs 3,4,5,6.

O ensaio PO.83.r teve a ruptura devido a ancoragem da barra, do lado 2. Na Figura 4.94 pode ser observado o comportamento carga *versus* deformação específica do grupo de extensômetro g3, localizados ao longo de cada barra, observando-se que os pares de extensômetros opostos apresentaram equilíbrio de deformações específicas melhores que do ensaio PO.82.r.

A Figura 4.95 apresenta o gráfico carga *versus* deslocamento dos LVDTs 3 e 4, 5 e 6. Observa-se que o LVDT 5 alcança seu valor máximo e as medições ocorrem com crescimento de deslocamento sem aumento de carga, no lado 2 do conjunto, confirmando a posição do rompimento obtido.

Em relação aos valores obtidos para os ensaios com ruptura devido a ancoragem da barra, e apresentados no Apêndice A, pode-se citar como pontos relevantes:

- Comparando-se a carga total da célula de carga principal ao valor previsto para cada ensaio observou-se que o ensaio uma diferença entre o valor previsto e o obtido de 71% para o ensaio PO.12, 78% para o ensaio PO.22, 87% para o ensaio PO.72.r, 100% para o ensaio PO.81, 86% para o ensaio PO.82.r, e 83% para o ensaio PO.83.r.
- Quando comparado o valor de carga por barra obtido pelas deformações, os valores obtidos superaram o valor esperado em 100% para os ensaios PO.12, PO.81 e PO.82.r; 70% par PO.22; 105% para o ensaio PO.72.r; e 87% para o ensaio PO.83.r.
- Comparando os valores de tensão normal os valores obtidos foram de 104% para o ensaio PO.12, 78% para o ensaio PO.22, 104% para o ensaio PO.72.r, 100% para os ensaios PO.81 e PO.82.r, e 87% para o ensaio PO.83.r.
- Comparando-se os valores de tensão de arrancamento os valores obtidos corresponderam a 104% para o ensaio PO.12, 78% para o ensaio PO.22, 107% para o ensaio PO.72.r, 145% para o ensaio PO.81; 147% para o ensaio PO.82.r, e 127% para o ensaio PO.83.r.
- Para o ensaio PO.12 há equilíbrio entre o somatório de deformações dos lados, porém ao analisar cada lado e cada barra, é possível verificar que a maior deformação específica não ocorreu na barra que rompeu; para o ensaio PO.72.r há equilíbrio entre as deformações obtidas, tanto em relação aos lados, quanto em relação as barras de cada lado, com pequena variação entre as deformações de cada barra. Quando os valores de deformação específica são comparados com os

ensaios com menos barras, esses apresentam valores inferiores, por existirem mais barras de maiores diâmetros; para o ensaio PO.81 a diferença entre o somatório das forças em cada lado do ensaio foi cerca de 50%, superior no lado 1, confirmando o rompimento do primeiro lado, e a maior deformação específica correspondente a barra rompida e os valores de deformação específica inferiores nas barras ocorreram devido a maior quantidade de barras com maiores diâmetros; para o ensaio PO.82. existe equilíbrio entre as solicitações em cada lado; para o ensaio PO.83.r a diferença entre o somatório das forças em cada lado do ensaio foi cerca de 10%, superior no lado 2; os carregamentos das barras estão equilibrados, com exceção da barra 3.

Com os resultados obtidos foi possível avaliar as solicitações aplicadas em cada ensaio. Esses valores são apresentados na Tabela 4.31, Tabela 4.32 e Tabela 4.33. Observa-se que a diferença entre os valores obtidos para tensão de arrancamento estão entre 3,21 e 6,70 MPa.

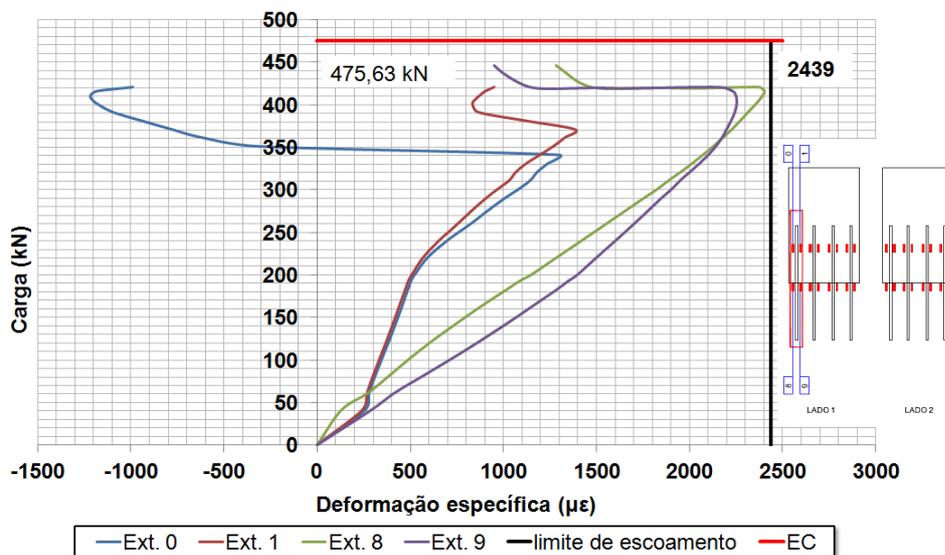


Figura 4.94 – Gráfico carga versus deformação específica – Ensaio PO.83.r, g3.

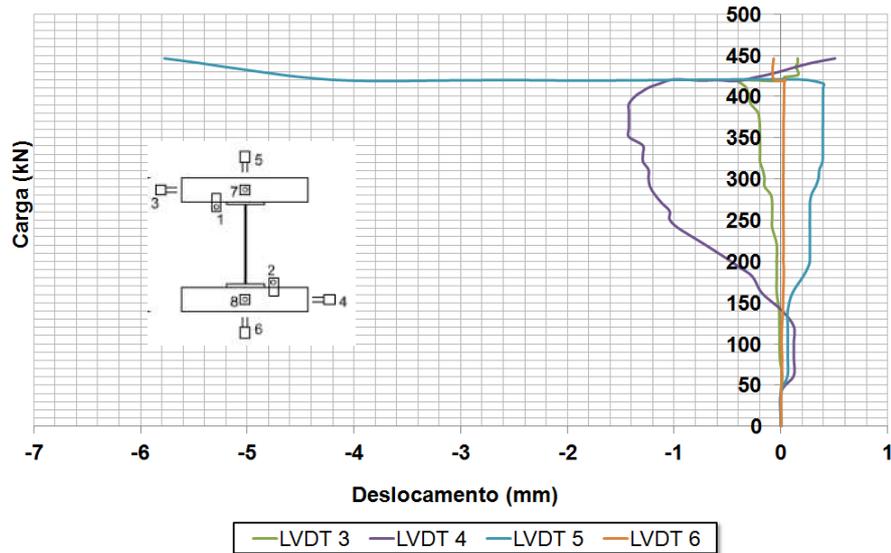


Figura 4.95 – Gráfico carga *versus* deslocamento – Ensaio PO.83.r, LVDTs 3,4,5,6.

Os ensaios PO.12, PO.22 e PO.72.r atingiram valores próximos aos previstos para as tensões. O mesmo não ocorreu para os ensaios PO.81, PO.82.r e PO.83.r, que tiveram diferenças consideráveis em relação ao esperado. A tensão normal quando comparada ao valor obtido pela deformação específica e o valor normal apresentam valores próximos. Quando comparado com o valor da carga total, a deformação específica apresenta sempre valores superiores.

Observa-se que ensaios com mais barras envolvidas, que significam maior área relativa as barras para suportar as cargas aplicadas, atingiram maiores valores de carga. Como mais barras estão envolvidas, menores são os níveis de deformações observadas em cada barra.

Os valores de carga obtidas nos ensaios foram próximos aos valores previstos. Porém, observa-se que os valores para os quais ocorrem esse fato é quando considera-se a deformação específica associada, e não quando considerado o valor obtido pela célula principal.

Tabela 4.31 – Resultados obtidos para a ruptura da ancoragem da barra – forças (parte 1).

Ensaio	Deformação específica ($\mu\epsilon$)		Força (kN)	
			Total	
	Interna	Externa	Prevista _(EC)	Obtida
PO.12	836,5	10942,0	596,20	424,12
PO.22	1746,0	3630,5	1146,50	890,90
PO.72.r	683,0	2540,0	515,90	450,50
PO.81	2294,5	2425,5	550,30	547,70
PO.82.r	1438,0	2851,0	550,30	474,80
PO.83.r	1613,0	2112,5	550,30	445,90

Tabela 4.32 – Resultados obtidos para a ruptura da ancoragem da barra – forças (parte 2).

Ensaio	Força (kN)					
	F/barra			F_barra		
	Prevista _(EC)	Obtida	Obt/prev	Prevista _(EC)	Obtida	Obt/prev
PO.12	149,05	106,03	0,71	100,53	105,00	1,04
PO.22	143,31	111,36	0,78	157,08	158,50	1,01
PO.72.r	128,98	112,63	0,87	157,08	163,58	1,04
PO.81	68,79	68,46	1,00	100,53	99,97	0,99
PO.82.r	68,79	59,35	0,86	100,53	101,00	1,00
PO.83.r	68,80	55,70	0,83	100,53	87,10	0,87

Tabela 4.33 – Resultados obtidos a ruptura pela ancoragem da barra – tensões.

Ensaio	Tensão normal (MPa)				Tensão arrancamento (MPa)			
	Célula	Def	Prev	Def/prev	Célula	Def	Prev	Def/prev
PO.12	527,35	521,00	500,00	1,04	3,25	3,21	3,08	1,04
PO.22	354,48	504,52	500,00	1,01	3,54	5,05	4,56	1,11
PO.72.r	358,50	520,70	500,00	1,04	3,98	4,88	4,56	1,07
PO.81	340,50	497,23	500,00	0,99	4,54	6,63	4,56	1,45
PO.82.r	295,18	502,33	500,00	1,00	3,94	6,70	4,56	1,47
PO.83.r	277,22	433,06	500,00	0,87	3,70	5,77	4,56	1,27

4.2.2.5. Rupturas descartadas

Não foram considerados para o estudo os ensaios que apresentaram resultados muito distintos ao esperado, sendo, porém, citados a seguir. Os resultados previstos são apresentados na Tabela 4.34.

O ensaio PO.22.r foi interrompido quando a carga atingiu 522,0 kN, devido a flambagem da alma. A Figura 4.96 apresenta o colapso da alma ocorrido no ensaio PO.22.r.

Tabela 4.34 – Ensaios descartados – resultados.

Modelo	Força (kN)		Modo de ruptura	
	Prevista	Obtida	Previsto	Obtido
PO.22.r	713,4	522,0	Do conector	Flambagem alma
PO.92	804,2	497,3	Barra	Deslizamento

O ensaio PO.22.r teve o colapso devido a flambagem da alma do perfil metálico, atingindo a força de 522,0 kN. No gráfico apresentado na Figura 4.97 pode ser observado o comportamento carga *versus* deformação específica do grupo de extensômetros g1, que se localiza na faixa horizontal fora da laje de concreto, sendo (a) relacionado ao lado 1 e o item (b) ao lado 2. Verifica-se que o extensômetro 12 ultrapassou o limite de escoamento, sendo desconsiderados os dados posteriores. Observa-se também a simetria das solicitações nos extensômetros localizados no mesmo ponto, opostamente.



Figura 4.96 – Colapso na alma do perfil metálico no ensaio PO.22.r (Ramires, 2010).

A Figura 4.98 apresenta a curva carga *versus* deslocamento dos transdutores de deslocamento (LVDTs) 1 e 2, 7 e 8. Observa-se no LVDT 1 um deslocamento diferenciado em relação ao LVDT 2, por estar localizado próximo ao conector de cisalhamento que iria romper, caso não ocorresse a flambagem da alma. O mesmo pode ser verificado no LVDT 8, que indicava a possibilidade da ruptura do conector até a flambagem da alma do perfil principal, mostrando que a ruptura do conector ocorreria provavelmente no lado 2 do *pull out*.

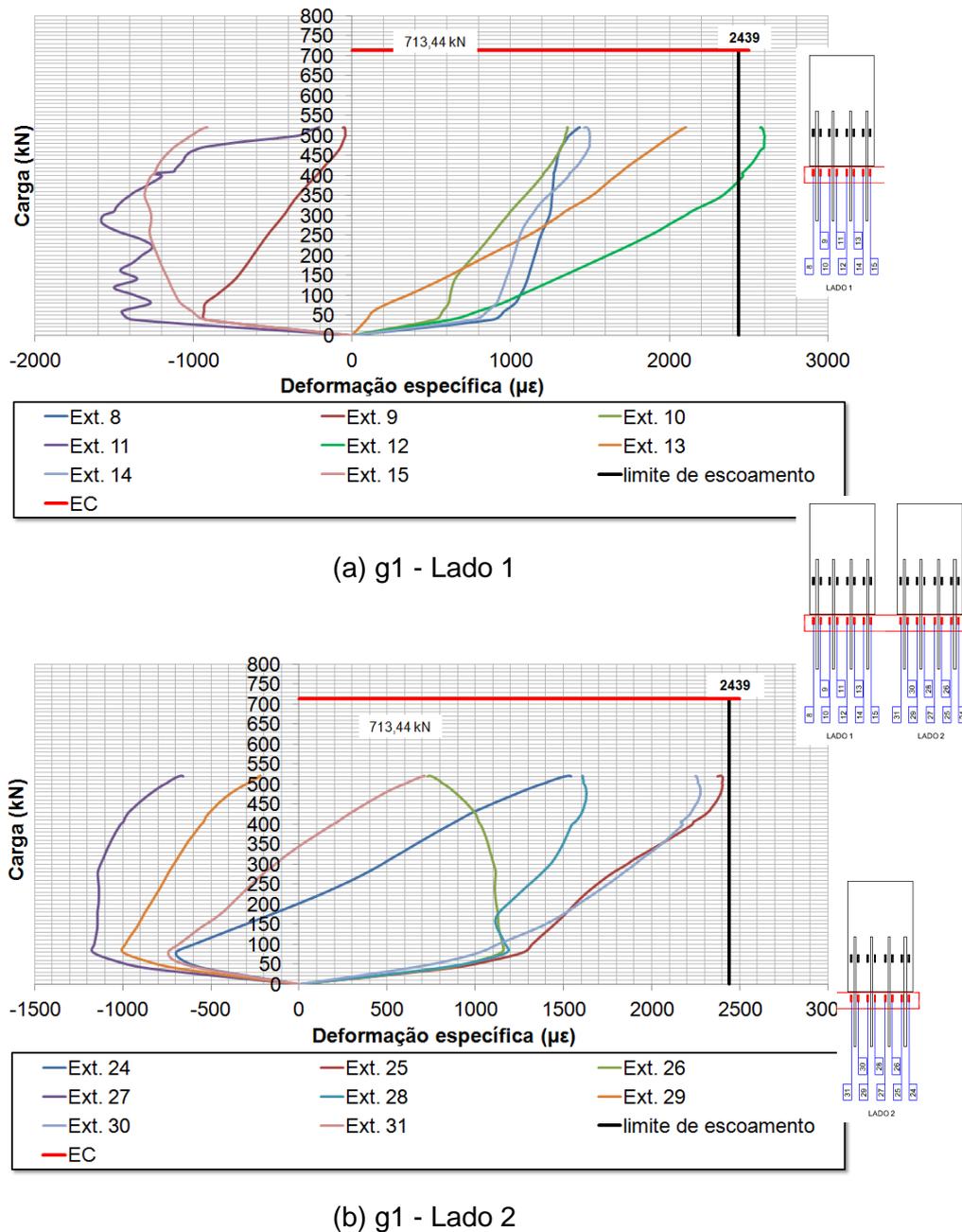


Figura 4.97 – Gráfico carga *versus* deformação específica - Ensaio PO.22.r, g1.

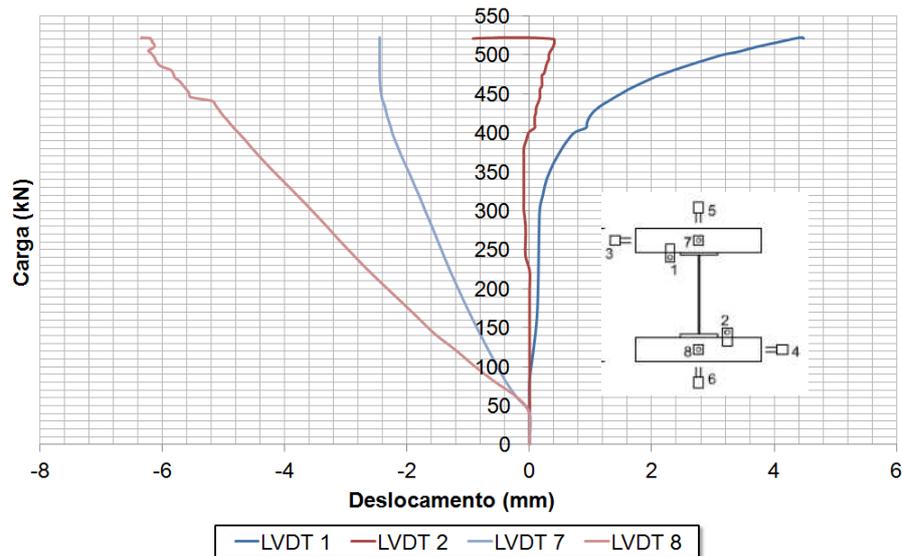


Figura 4.98 – Gráfico carga versus deslocamento - Ensaio PO.22.r, LVDTs 1,2,7,8.

Dos valores obtidos para o ensaio PO.22.r e apresentados no Apêndice A, pode-se observar que:

- A carga total obtida pela célula de carga correspondeu a 73% do valor previsto. O valor do somatório das forças correspondeu a 8% superior ao da célula de carga principal.
- Para tensão normal observa-se que atingiu um valor de 42% do valor esperado. Comparando-se os valores para uma barra referentes aos cálculos pelos extensômetros e pela força total, observa-se a diferença de 4% inferior.
- A tensão de arrancamento atingiu valor 71% superior ao previsto.
- Observa-se equilíbrio entre o somatório das forças em cada lado do ensaio, com diferença de 10% entre os lados. A barra 3 apresenta diferença entre as barras do lado 1. No lado 2, as barras 5 e 8 são próximas e as barras 6 e 7 também.

O ensaio PO.92 foi modificado, não considerando-se assim a parcela de resistência do conector, sendo esperado o valor de 804,2 KN para o rompimento da barra. Para esse ensaio foi obtido o valor de 497,3 KN, não atingindo a ruptura esperada, pois ao atingir esse patamar houve uma falha relativa a

aderência entre o concreto e o perfil metálico, havendo assim, o desmembramento entre esses dois elementos.

No ensaio PO.92 ocorreu a ruptura inesperada, pelo deslizamento do perfil metálico em relação a laje de concreto. A Figura 4.99 apresenta o início da formação do cone de rompimento do concreto, o que levava a considerar que o rompimento seria por esse modo de ruptura. Porém, é possível verificar o deslizamento citado como fator de término do ensaio. Observou-se que nesse caso, mesmo não havendo a aplicação das solicitações sobre os conectores, a região próxima a esse elemento perdeu a aderência com o concreto, que culminou em seu arrancamento, visualizado por meio da formação do cone de arrancamento próximo ao conector.

A Figura 4.63 apresenta os resultados para os ensaios PO.92 referente ao grupo de extensômetros g3. Observa-se que os valores obtidos foram distintos em cada extensômetro, e foram observados picos no extensômetro 15 na força próxima a 350 kN.

Dos valores obtidos para o ensaio PO.92 e apresentados no Apêndice A, pode-se observar que:

- A carga total obtida pela célula de carga correspondeu a 62% do valor previsto. O valor do somatório das forças correspondeu a 92% inferior ao da célula de carga principal.
- Para tensão normal observa-se 62% do valor esperado. Comparando-se os valores para uma barra referentes aos cálculos pelos extensômetros e pela força total, observa-se a diferença de 8% inferior ao valor previsto.
- A tensão de arrancamento alcançou 75% do valor esperado para o ensaio.
- O lado 1 foi mais solicitado que o lado 2, correspondendo a diferença de 5% de recebimento de solicitações. Observam-se valores consistentes para as deformações específicas de um mesmo lado, exceto para as barras 3 e 5.

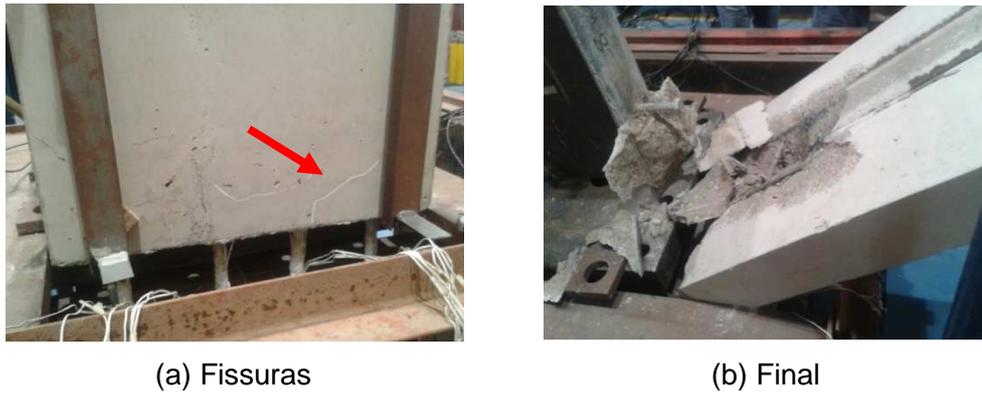


Figura 4.99 – Situação após a ruptura inesperada – PO.92.

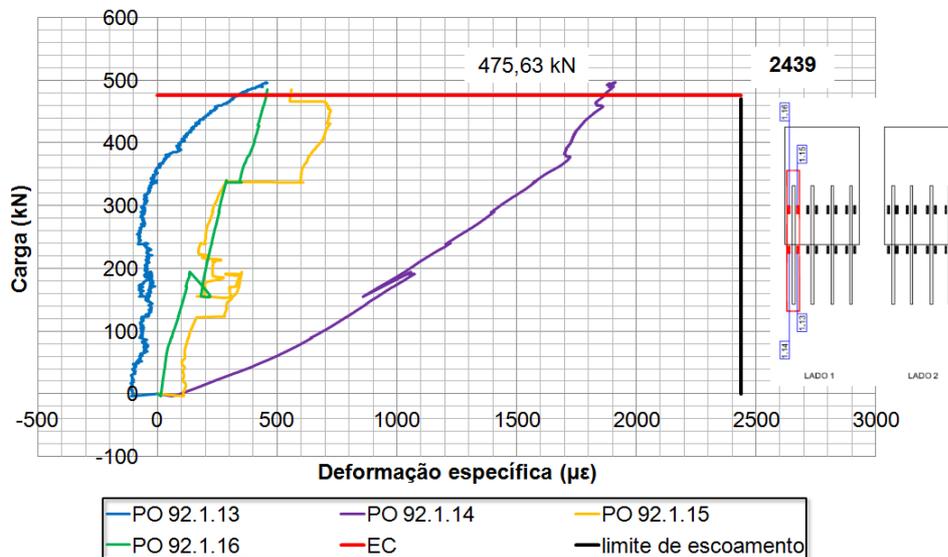


Figura 4.100 – Gráfico carga versus deformação específica – Ensaio PO.92, g3.

A Figura 4.101 apresenta a comparação dos resultados obtidos para obtenção da carga aplicada, a saber: células principais, células secundárias e extensômetros nas barras redondas. Observa-se que no gráfico apresentado existe uma fase de carregamento e descarregamento, seguindo até a ruptura do ensaio. Verifica-se que para esse caso, as três medições totais indicaram valores distintos entre si, com valores inferiores as demais da célula de carga principal. Comparando-se os resultados individuais das células secundárias e do extensômetros nas barras observam-se valores superiores no segundo caso.

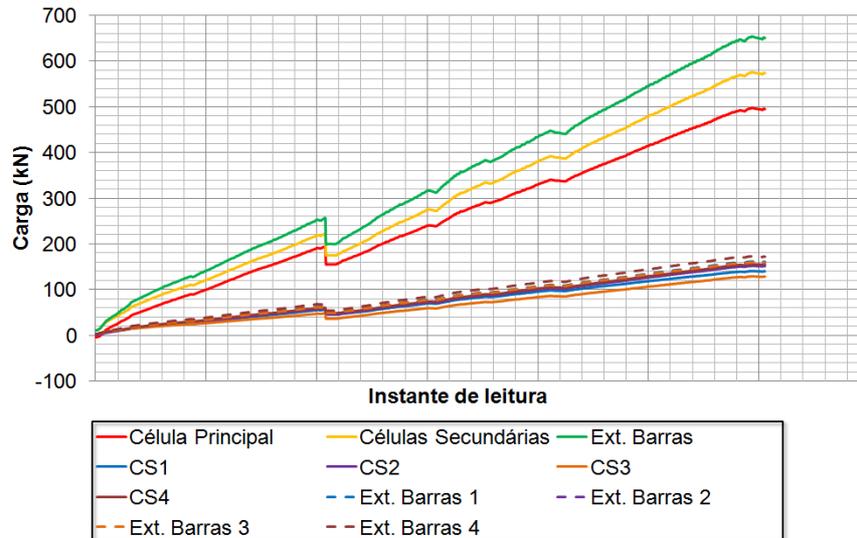


Figura 4.101 – Gráfico carga versus instante de leitura – Ensaio PO.92 – células de carga.

Conforme os itens relatados, a Tabela 4.35 e Tabela 4.36 apresentam um resumo dos resultados obtidos para as Séries S2010 e S2014, e a comparação ao previsto, bem como se houve modificação ou não na execução do ensaio.

Tabela 4.35 – Resumo dos ensaios Séries S2010 e S2014 – parte 01.

Série	Ensaio	Força (kN)		Modo de ruptura		Modificação do ensaio
		Prevista	Obtida	Previsto	Obtido	
Pré	PO.01	402,1	535,0	B	B 4	não
	PO.0.2	402,1	385,0	B	Conector	não
PO.1X	PO.11	402,1	351,3	B	B 3	sim
	PO.12	402,1	424,1	B	AB 2	sim
	PO.11.r	402,1	319,0	B	SC	não
	PO.12.r	402,1	384,0	B	SC	não
	PO.13.r	402,1	516,0	B	B 4	sim
PO.2X	PO.21	713,4	253,7	Conector	SC	não
	PO.22	1146,5	890,9	AB	AB 8	sim
	PO.21.r	713,4	437,9	Conector	SC	não
	PO.22.r	713,4	522,0	Conector	Flambagem	não
	PO.23.r	713,4	413,0	Conector	SC	não

Legenda: B - Barra / AB - Ancoragem da Barra / SC - Solda do Conector

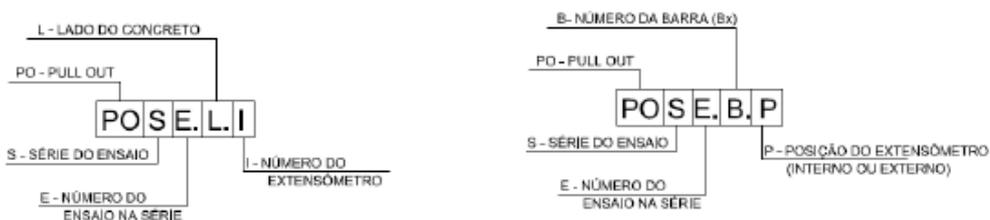
Tabela 4.36 – Resumo dos ensaios Séries S2010 e S2014 – parte 02.

Série	Ensaio	Força (kN)		Modo de ruptura		Modificação do ensaio
		Prevista	Obtida	Previsto	Obtido	
PO.7X	PO.71.r	480,9	415,0	AB	SC	não
	PO.72.r	480,9	448,6	AB	AB 2	sim
	PO.73.r	480,9	435,0	AB	SC	não
PO.8X	PO.81	550,3	547,7	AB	AB 2	sim
	PO.81.r	475,6	268,4	Conector	SC	não
	PO.82.r	475,6	474,3	AB	AB 2	sim
	PO.83.r	475,6	445,9	AB	AB 6	sim
PO.9X	PO.91	475,6	379,5	Conector	SC	não
	PO.92	804,2	497,3	B	Deslizamento	sim
	PO.93	475,6	307,5	Conector	SC	não

Legenda: B - Barra / AB - Ancoragem da Barra / SC - Solda do Conector

4.2.2.6.**Comparação entre séries de ensaios não modificados**

Para analisar as influências das componentes entre os ensaios, foram efetuadas comparações entre os diversos ensaios apresentados com os ensaios com ruptura devido a solda dos conectores (o estudo das soldas foi apresentado no item 4.1). Para isso, nos gráficos são apresentadas as médias de valores de deformação específica obtidas para os extensômetros localizados na mesma posição e opostos das barras. Para identificação dos extensômetros foi definido o seguinte código: PO.XX.r, referente aos ensaios da Série S2010; BX, número da barra no ensaio; I ou E, relativo ao lado interno ou externo da laje de concreto. A Figura 4.102 apresenta o significado da simbologia adotada, para facilitar o entendimento do ensaio executado. A única diferença existente para os ensaios da Série S2014 é a supressão da letra r, que indica os ensaios da Série S2010.

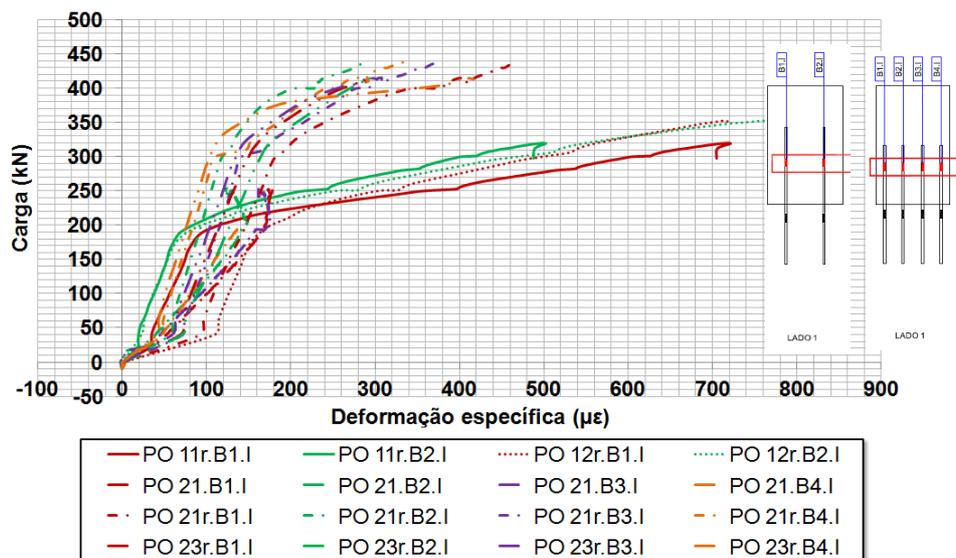


(a) extensômetros individuais

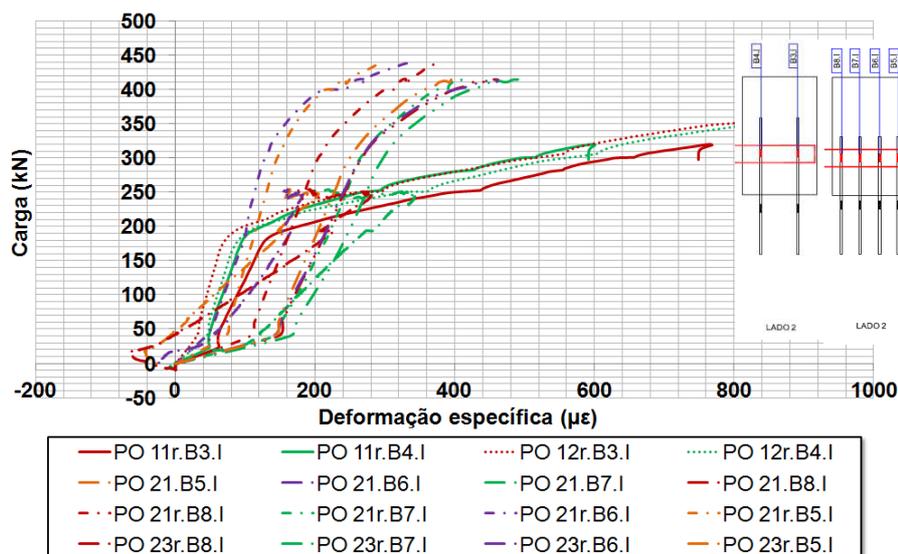
(b) extensômetros por posição na barra

Figura 4.102 – Simbologia dos extensômetros.

Para analisar a influência da componente comprimento de armadura, são efetuadas as comparações entre os resultados dos grupos de ensaios PO.1X e PO.2X (PO.11.r, PO.12.r, PO.21, PO.21.r, PO.23.r). Sendo assim, a Figura 4.103 apresenta a curva carga *versus* deformação específica para o grupo g2. Observa-se que o escoamento do aço da armadura principal, para os ensaios do grupo PO.1X inicia-se antes dos ensaios do grupo PO.2X, indicando que a resistência é inferior quando o comprimento de ancoragem é aumentado (650 mm, para PO.1X e 500 mm, para PO.2X).



(a) Lado 1



(b) Lado 2

Figura 4.103 – Carga *versus* deformação específica do grupo g2 – PO.1X e PO.2X.

Realizando-se a comparação entre os grupos PO.1X e PO.7X procura-se analisar a influência da quantidade de barras e da quantidade de conectores. O gráfico carga *versus* deformação específica para o grupo g3 é apresentado na Figura 4.104. Nota-se que para os dois casos, os valores obtidos de deformação específica externas e internas são próximos para os ensaios das séries, sendo ligeiramente superiores para os ensaios PO.7X comparados ao PO.1X, não sendo alcançados os limites de escoamento do aço.

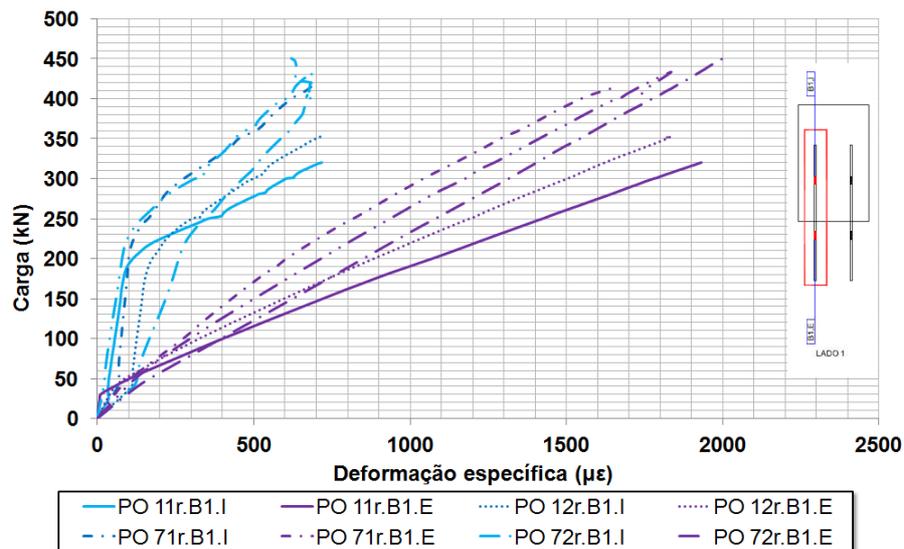
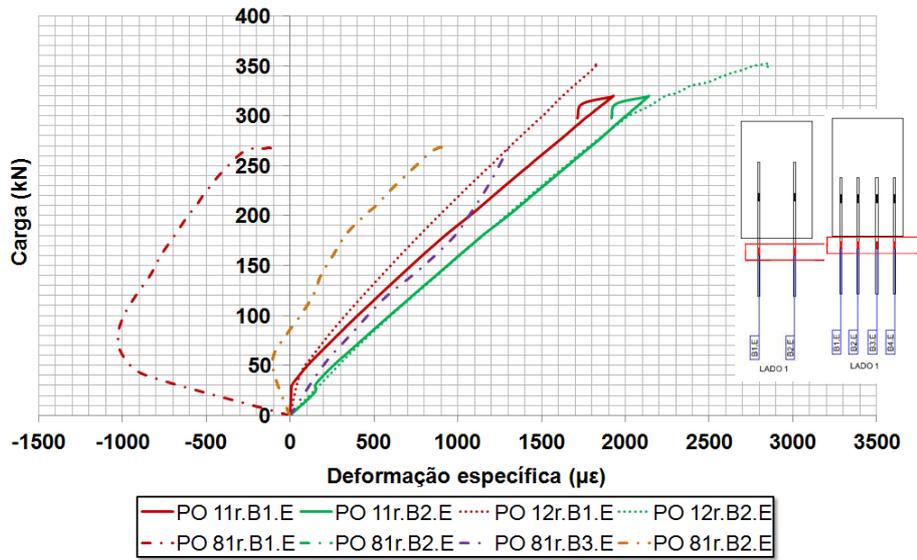
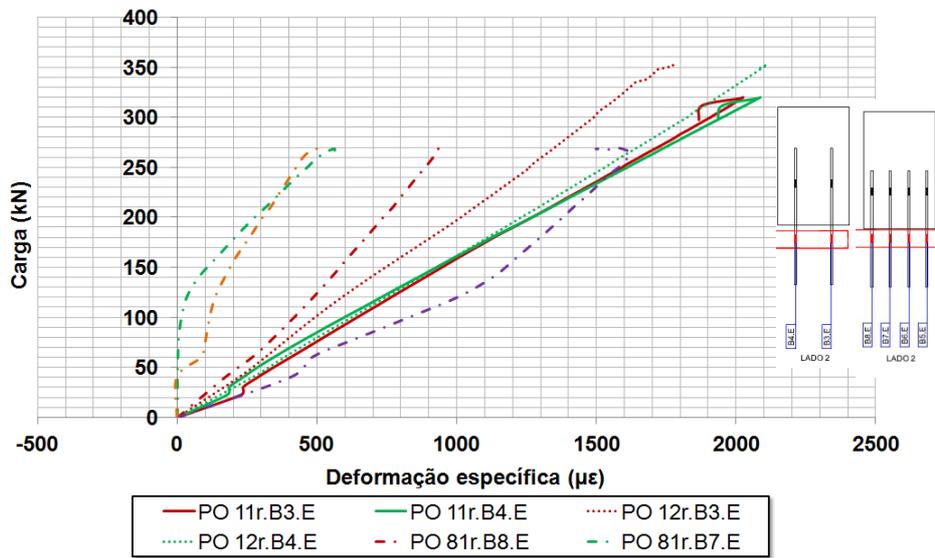


Figura 4.104 – Carga *versus* deformação específica do grupo g3 – PO.1X e PO.7X.

A mesa análise pode ser realizada comparando-se os ensaios PO.1X e PO.8X. Os resultados são apresentados na curva carga *versus* deformação específica na Figura 4.105, para o grupo g1. Pode-se observar na série PO.8X valores superiores ao da PO.1X, indicando que o maior número de barras no ensaio aumenta a carga resistida pelo conjunto, também podendo ser influenciado pela menor distância entre os conectores de cisalhamento. A Figura 4.106 mostra o gráfico para o grupo g5, onde pode ser observado a diferença entre os extensômetros internos a laje e os externos, e que, para as duas séries o valor das deformações externas foram inferiores aos da interna, além de uma diferença entre os pontos na barra inferior para a série PO.8X, tendo relação provável ao comprimento de ancoragem do ensaio, que é inferior a outra série (500 mm em comparação a 650 mm).



(a) Lado 1



(b) Lado 2

Figura 4.105 – Carga versus deformação específica do grupo g1 – PO.1X e PO.8X.

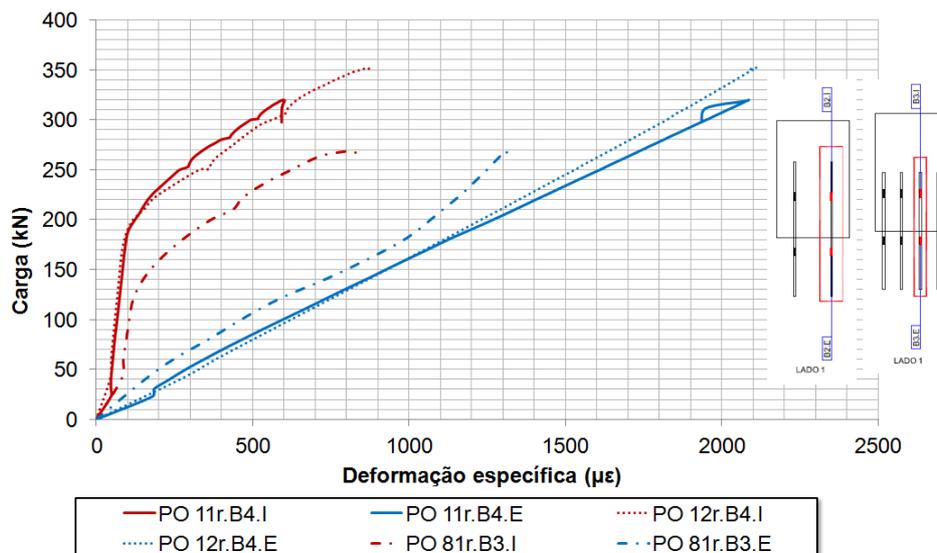
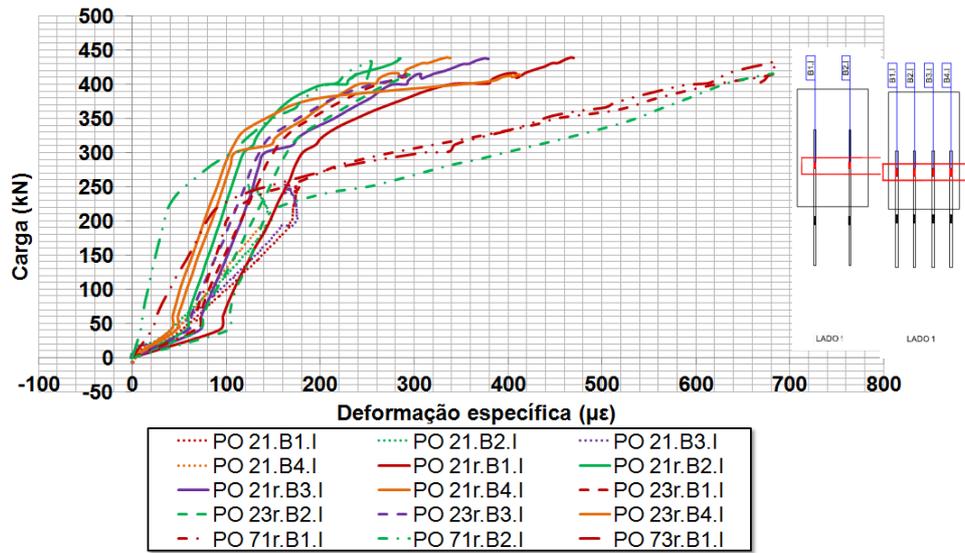


Figura 4.106 – Carga versus deformação específica do grupo g5 – PO.1X e PO.8X.

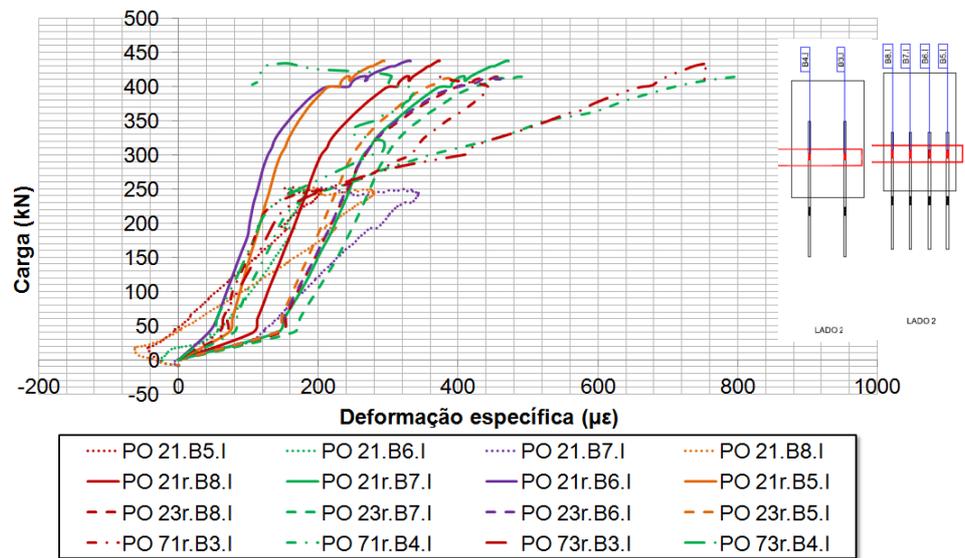
A comparação entre os ensaios dos grupos PO.2X e PO.7X permite avaliar o diâmetro das barras e a quantidade de conectores. A Figura 4.107 apresenta a curva carga versus deformação específica para o grupo g2, sendo possível verificar que para o lado 2 não há grande diferença dos valores obtidos para as duas séries, que não se repete no lado 1, que apresenta valores de deformações levemente diferentes para os ensaios da série PO.2X, provavelmente ocorrido devido ao maior número de conectores nessa série e menor número de barras. Na Figura 4.108 verifica-se que devido ao maior diâmetro da barra da armadura principal os valores de deformações foram superiores ao do ensaio PO.7X.

Para avaliar a quantidade de barras e o espaçamento entre os conectores, foram comparados os grupos PO.2X e PO.8X. A Figura 4.109 apresenta a curva carga versus deformação específica para o grupo g9, podendo ser observado que os valores de deformação específica obtidos interna e externamente a laje de concreto foram superiores para cargas menores na série PO.8X que para os PO.2X. Observa-se uma grande diferença de comportamento entre os ensaios das Séries S2010 e S2014.

Os ensaios PO.7X.r e PO.8X.r comparados permite a avaliação do comprimento de ancoragem da armadura principal. Assim sendo, a Figura 4.110 mostra a curva carga versus deformação específica para o grupo g2 observando-se que a curva inicia o escoamento com carga inferior do PO.8X que do PO.7X, indicando que o comprimento de ancoragem da série PO.8X pode ter influenciado nesse valor inferior.



(a) Lado 1



(b) Lado 2

Figura 4.107 – Carga versus deformação específica do grupo g2 – PO.2X e PO.7X.

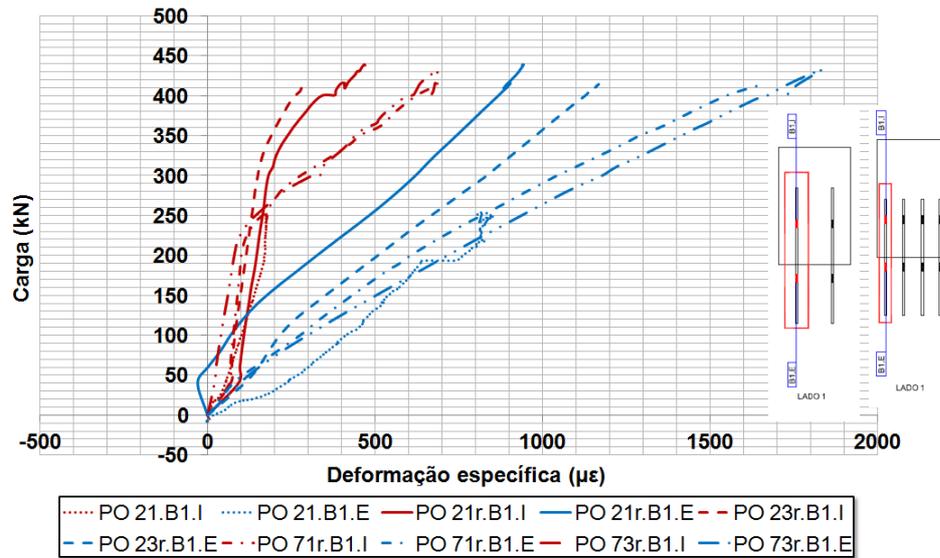


Figura 4.108 – Carga versus deformação específica do grupo g3 – PO.2X e PO.7X.

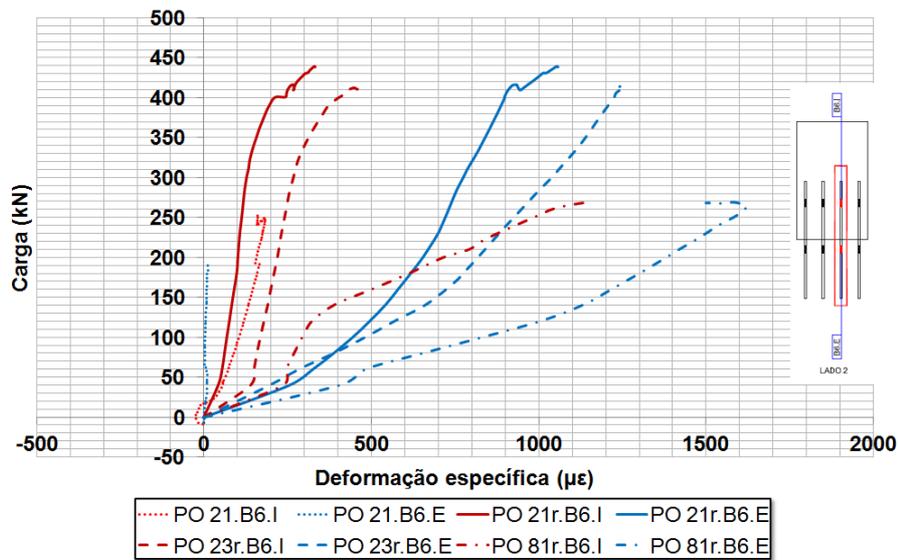
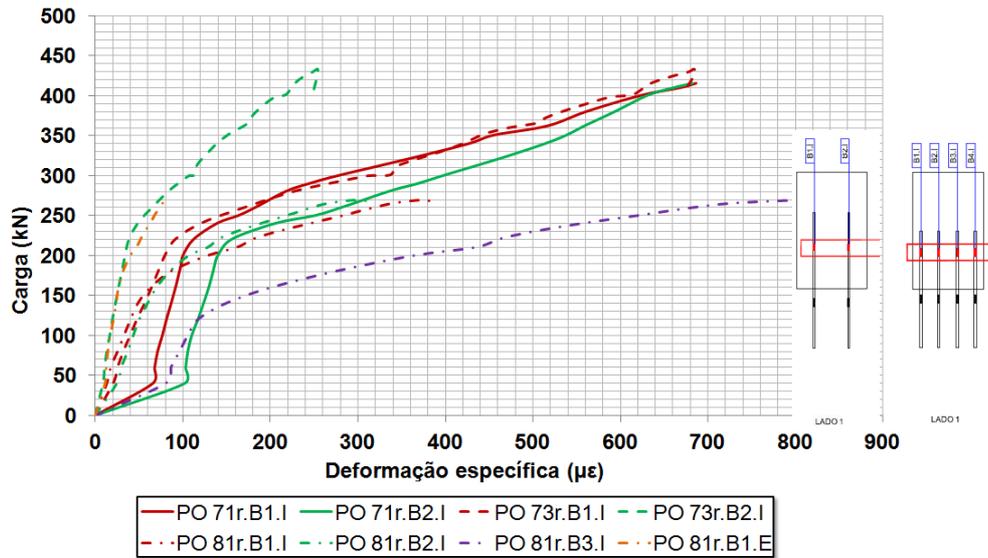
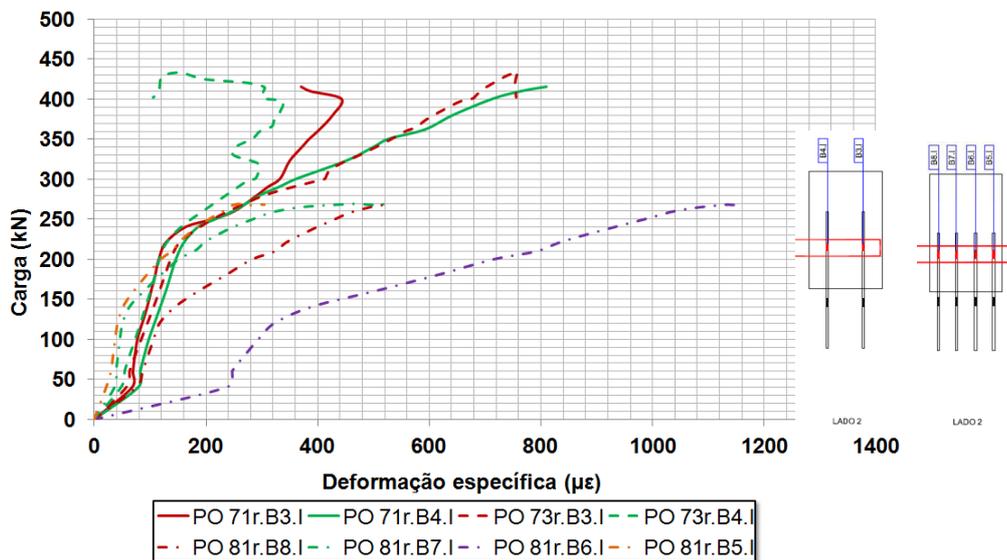


Figura 4.109 – Carga versus deformação específica do grupo g9 – PO.2X e PO.8X.



(a) Lado 1



(b) Lado 2

Figura 4.110 – Carga versus deformação específica do grupo g2 – PO.7X e PO.8X.

A comparação entre os grupos PO.2X e PO.9X permite a avaliação do espaçamento e a quantidade dos conectores, o diâmetro e o comprimento das barras. O grupo g2 permite a avaliação de todos esses elementos em conjunto. A Figura 4.111 apresenta a curva carga versus deformação específica do grupo, referente ao lado 1 da laje de concreto, observa-se que os valores de deformação específica obtidos internamente a laje foram próximos entre as séries, apesar da diferença entre os padrões observados entre os ensaios.

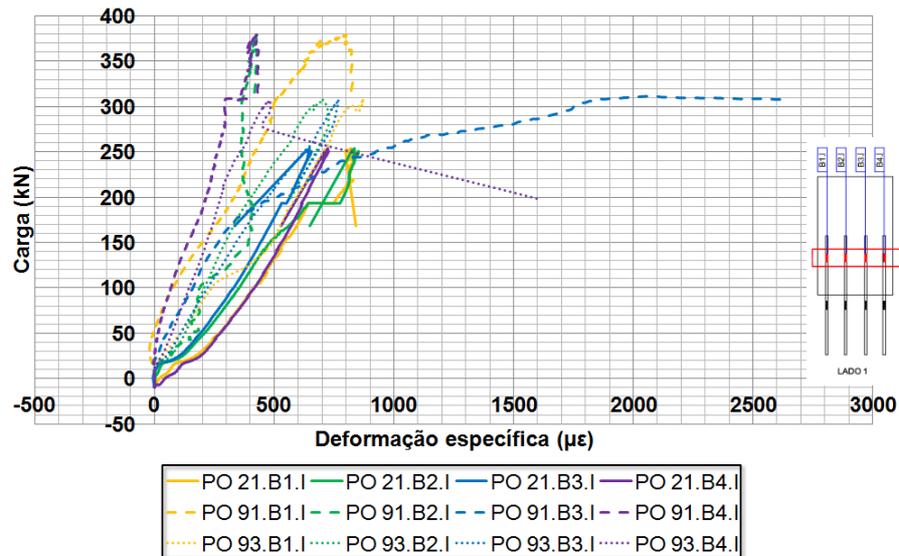


Figura 4.111 – Carga *versus* deformação específica do grupo g2, lado 1 – PO.2X e PO.9X.

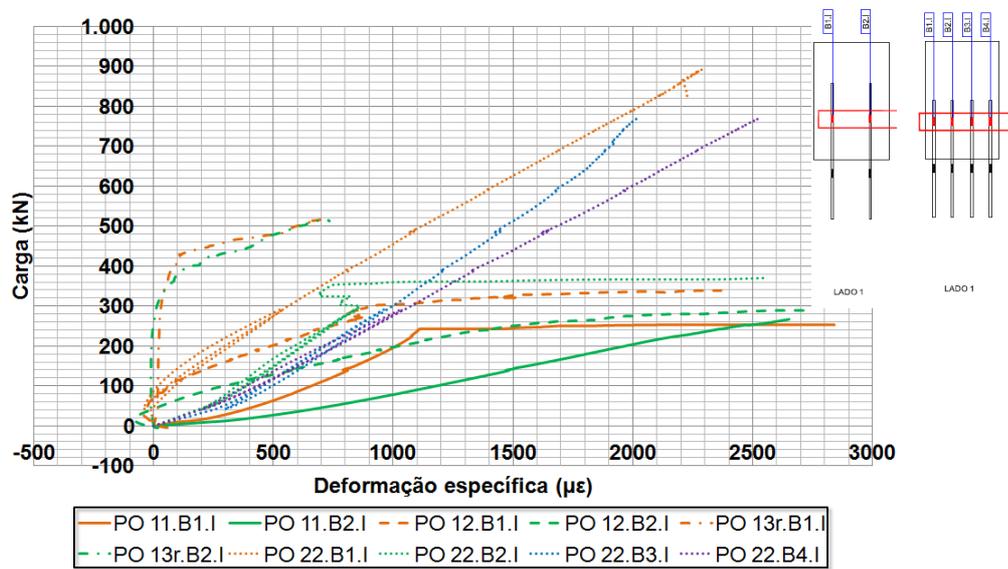
4.2.2.7. Análise dos ensaios modificados

Nesta seção serão apresentadas as comparações entre os ensaios que tiveram modificações, para que não houvesse o rompimento devido a solda do conector, ou seja, os ensaios com modo de ruptura da ancoragem da barra ou da própria barra. As nomenclaturas dos ensaios seguem a apresentada para a comparação dos testes não modificados e os resultados são apresentados em relação a média de pontos de medição dos extensômetros.

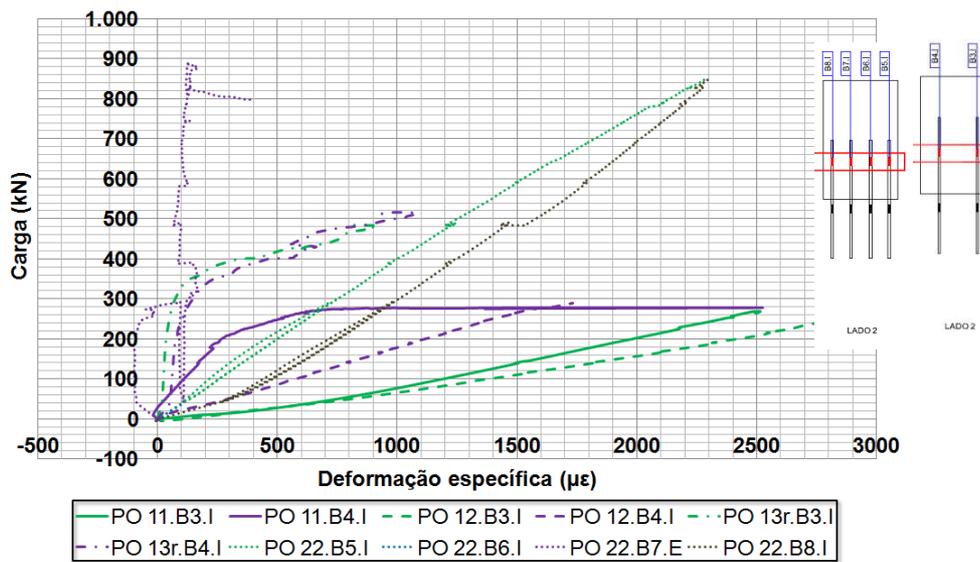
Para analisar a influência da componente comprimento de armadura foram comparados os resultados das séries de ensaios PO.1X e PO.2X. Sendo assim, a Figura 4.112 apresenta a curva carga *versus* deformação específica para o grupo g2. Observa-se que o escoamento do aço da armadura principal, para os ensaios da série PO.1X iniciou-se antes dos ensaios da série PO.2X, indicando que a resistência é inferior quando o comprimento de ancoragem também é inferior (650 mm para PO.1X, e 500 mm, para PO.2X). O ensaio PO.13.r apresentou comportamento diferente dos ensaios das Série S2014.

A comparação entre os ensaios PO.1X e PO.8X é realizado para analisar a quantidade de barras e a quantidade de conectores de cada ensaio. Os resultados do grupo g1 são apresentados na curva carga *versus* deformação específica na Figura 4.113. Pode-se observar na série PO.8X forças superiores ao da PO.1X, indicando que o maior número de barras no ensaio aumenta a

resistência do conjunto, também podendo ter sido influenciado pela menor distância entre os conectores de cisalhamento.

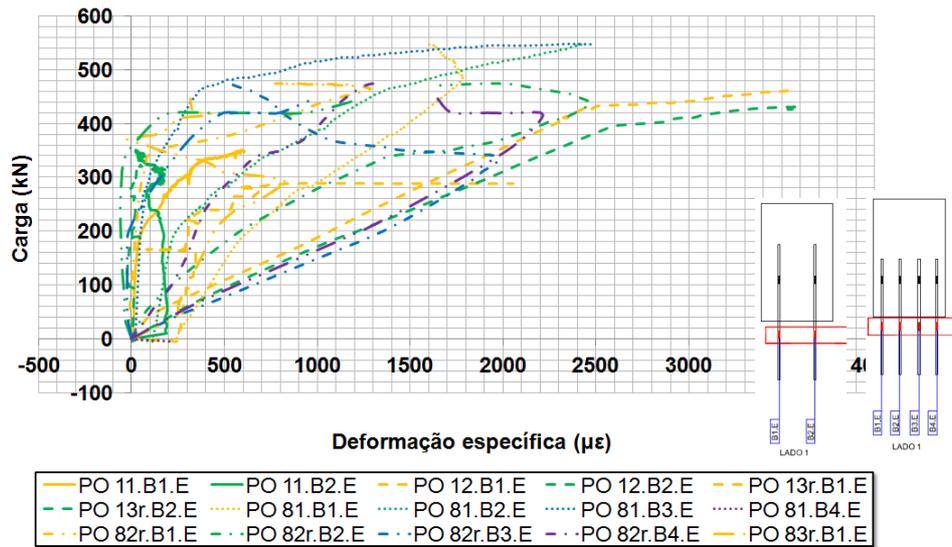


(a) Lado 1

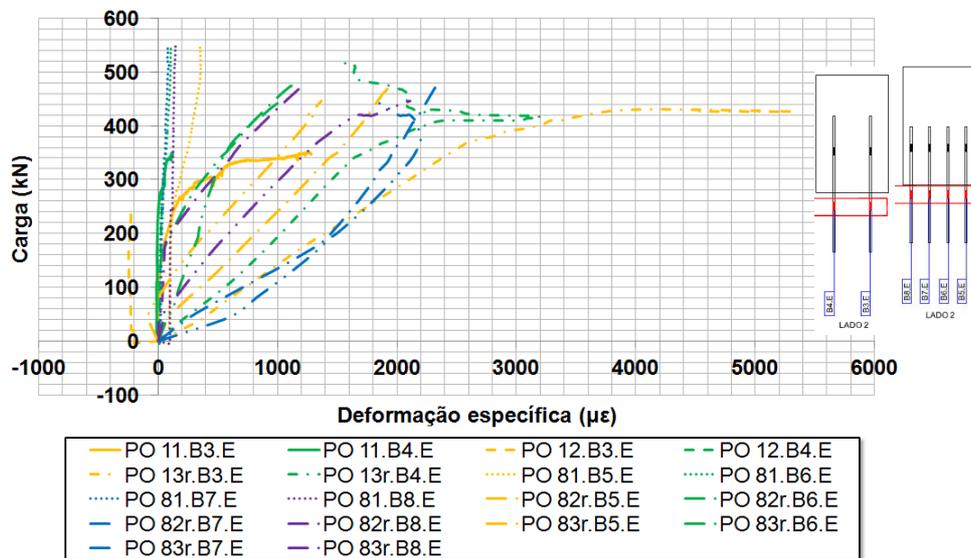


(b) Lado 2

Figura 4.112 – Carga versus deformação específica do grupo g2 – PO.1X e PO.2X.



(a) Lado 1



(b) Lado 2

Figura 4.113 – Carga versus deformação específica do grupo g1 – PO.1X e PO.8X.

A comparação entre as série PO.1x e PO.9x não foi possível ser realizada, pois o ensaio modificado da série PO.9X teve sua ruptura por um modo de ruptura não previsto e o resultado foi descartado, conforme seção 4.2.2.5. O mesmo ocorre para PO.2x e PO.9x e PO.8x e PO.9x.

Para avaliar a quantidade de barras e o espaçamento entre os conectores, foram comparados os grupos PO.2X e PO.8X. A Figura 4.114 apresenta a curva carga versus deformação específica para o grupo g5, podendo ser observado que os valores de deformação específica obtidos interna e externamente à laje

de concreto foram semelhantes entre os dois ensaios, com os extensômetros externos indicando valores superiores aos dos extensômetros internos. Observa-se ainda uma maior diferença entre os valores obtidos para a série PO.2X em relação aos da série PO.8X.

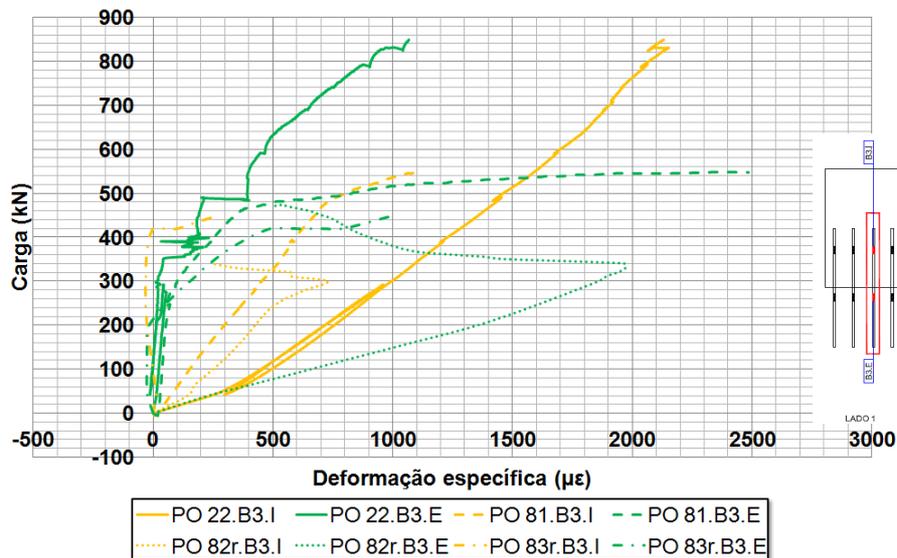


Figura 4.114 – Carga versus deformação específica do grupo g5 – PO.2X e PO.8X.

Com os resultados apresentados, observa-se que o desenvolvimento de um ensaio de *pull out* modificado foi realizado com resultados satisfatórios, mesmo tendo ocorrido problemas relativos à solda dos conectores de cisalhamento e mesas da viga, e diminuição da resistência do conjunto. A criação de um sistema de travamento para esses ensaios necessitou de estudos mais detalhados, considerando-se os fatores limitantes para seu desenvolvimento e a adequação para todas as séries realizadas a necessidade de um sistema de montagem e desmontagem simples, tendo sido possível atingir esse objetivo.

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos ensaios realizados para as Séries S2010 e S2014 e os ensaios dos conectores, para confirmação das pernas de soldas dos ensaios realizados. No próximo capítulo serão apresentados os estudos relativos à análise numérica da solda dos conectores.