

Os deslocamentos (flechas) foram medidos por defletômetros analógicos, posicionados nos mesmos pontos da viga anterior. A técnica de transferência das cargas para a viga foi de forma análoga ao procedimento do ensaio anterior. O mesmo perfil com seção "I" foi utilizado, sendo mantidas as distancias para os bordos da viga.

Para uma melhor visualização dos resultados serão apresentados, a seguir, todos os ciclos em um único gráfico (figura 169).

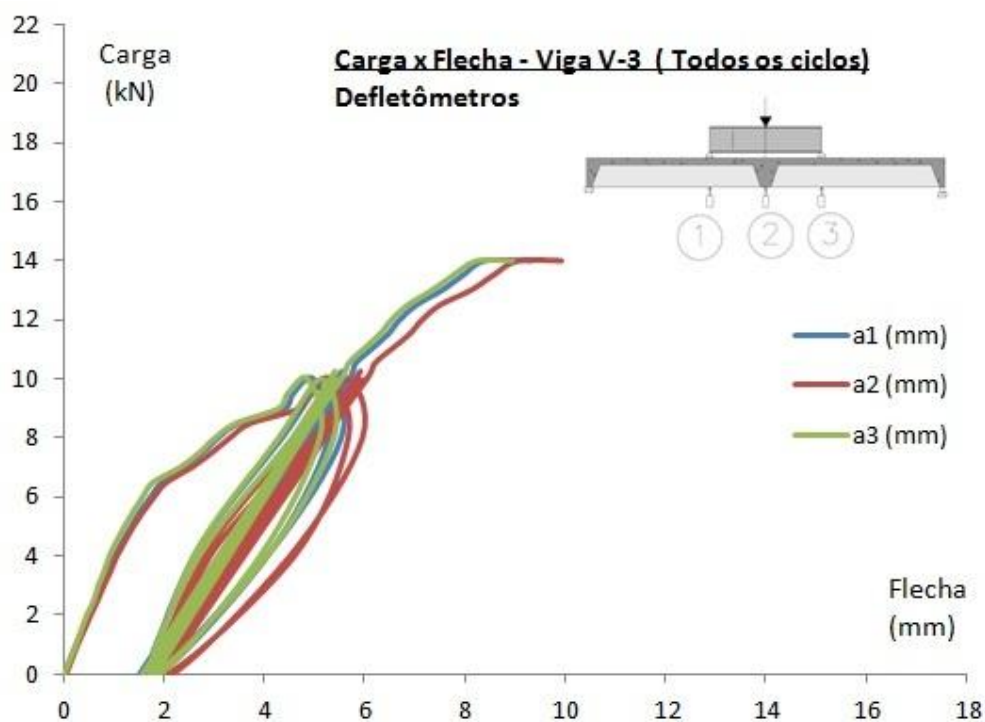


Figura 169 – Gráficos Carga x Flecha da Viga V-3- ciclos

4.7 Ensaios dos painéis de laje PL-01 e PL-02

4.7.1 Metodologia para aplicação das cargas

Nos itens subsequentes deste trabalho serão calculadas as larguras colaborantes, a partir dos deslocamentos (flechas) medidos no centro das lajes, a cada acréscimo de carga. A obtenção dos valores da largura colaborante foi feita com a aplicação de carga parcialmente distribuída em chapa posicionada no centro das lajes, em procedimento semelhante ao adotado por Khalil e Abdul-Wahab (2000) em seus ensaios. O esquema utilizado para aplicação de cargas em PL-01 será apresentado na figura e detalhe a seguir (figuras 170 e detalhe).

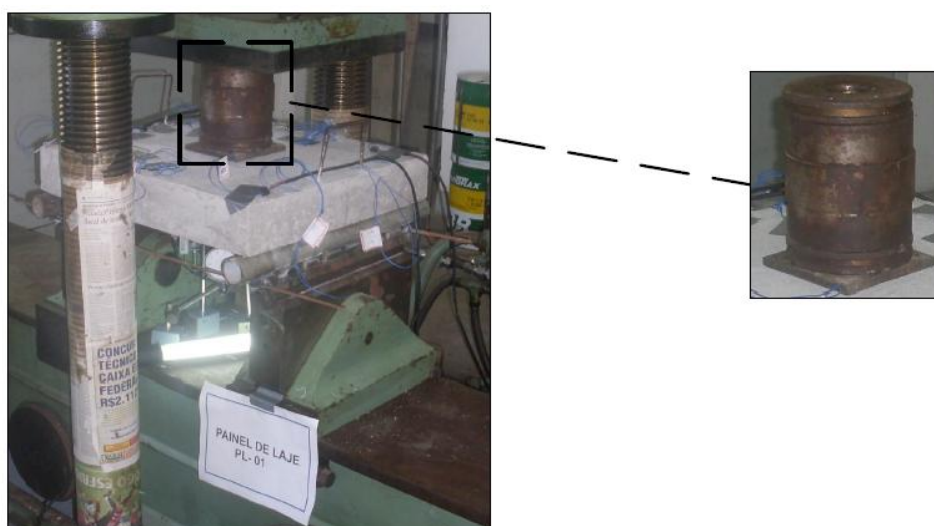


Figura 170 – Detalhe de aplicação de cargas em PL-01

Na laje PL-02 foram feitos ajustes, para regularizar a superfície de contato entre a chapa e o concreto. Para isto utilizado enxofre derretido que foi aplicado sobre a laje, lançado-se em seguida a chapa e gerando uma interface regular entre o concreto e o aço. O aspecto da chapa utilizada em PL-02 pode ser visto na figura a seguir (figura 171 e detalhe).

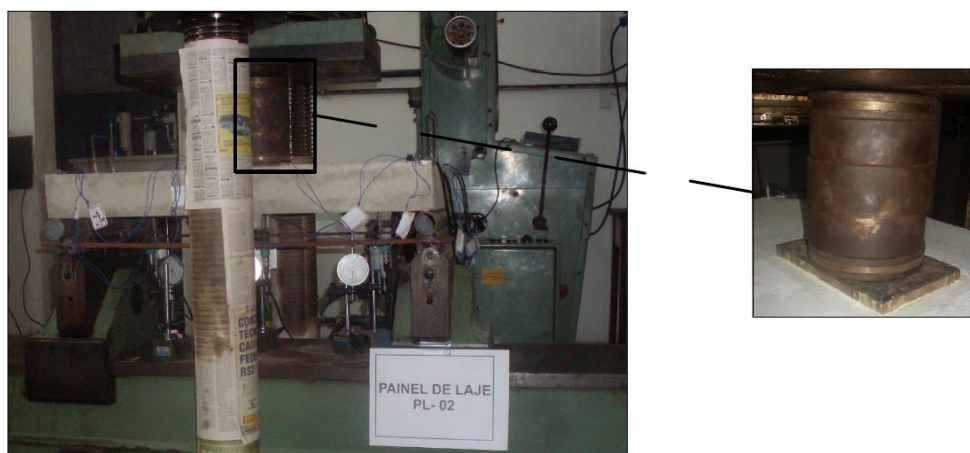


Figura 171 – Detalhe de aplicação de cargas em PL-02

Em ambos os casos, a proporção entre as dimensões da chapa utilizada para distribuição das cargas e os vãos das lajes foi de 0,25, ou seja, $a/l_x = 0,25$ e $b/l_y = 0,25$. O valor da carga distribuída será dado por: $q = P/(a \times b)$, em KN/cm^2 . As dimensões da laje (l_x e l_y) e da chapa consideradas estão ilustradas na figura a seguir (figura 172).

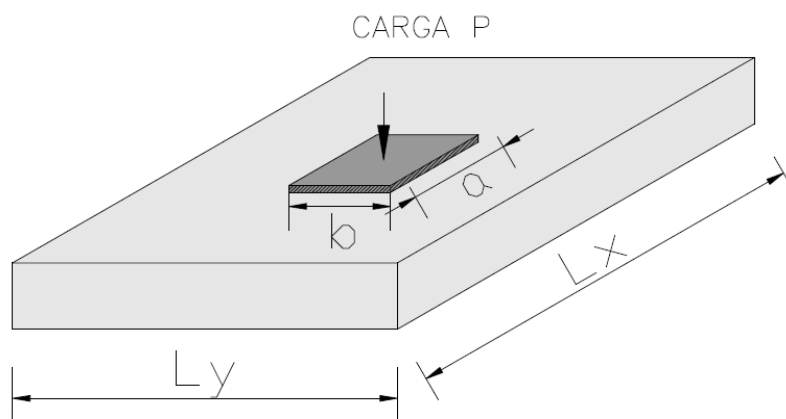


Figura 172 – Detalhe da proporção entre a chapa e os vãos das lajes

As chapas de aço que foram usadas nos ensaios dos painéis de laje PL-01 e PL-02 terão suas dimensões resumidas na tabela a seguir (tabela 39).

Tabela 39– Resumo das dimensões das chapas utilizadas nos ensaios das lajes

Características das chapas				
Laje	a (cm)	b (cm)	espessura.(")	área (cm ²)
PL-01	14,50	14,50	0,5"	210,25
PL-02	21,00	14,50	0,5"	304,5

4.7.2 Ensaio de PL-01

Objetivando uma adequação entre a largura do apoio do carro da prensa e o painel de laje PL-01, confeccionou-se um quadro rígido composto por dois tubos de aço galvanizado com ϕ 2,0" ligados por hastes executadas com barras de ϕ 10,0mm. Este quadro era sobreposto aos apoios originais da prensa, apoiando-se sobre ele o painel de laje conforme o apresentado na figura a seguir (figura 173).

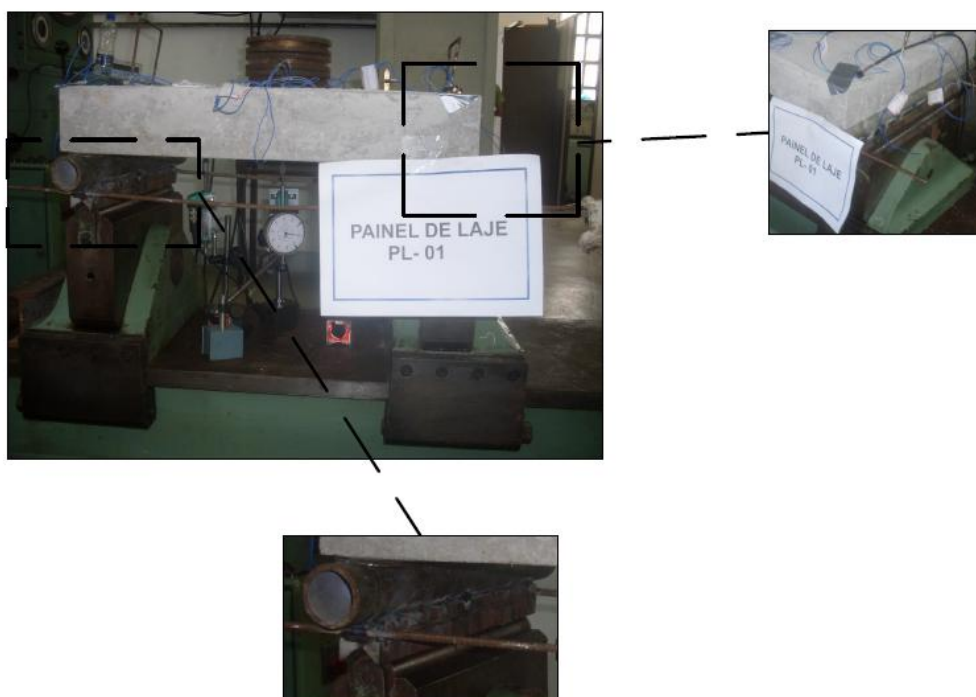


Figura 173 – Detalhe do quadro para apoio de PL-01

4.7.2.1 Verificação das flechas de PL-01

Para uma medição dos deslocamentos (flechas) do painel de laje PL-01, foram utilizados três transdutores e um defletômetro. Seguindo os procedimentos dos ensaios anteriores, estes equipamentos foram mantidos até um patamar de carga em que o estado de fissuração da peça poderia ocasionar danos aos mesmos.

Na foto a seguir será apresentado PL-01 conectada aos equipamentos de aquisição de dados, antes do ensaio (figura 174)



Figura 174 – Detalhe de PL-01 conectada ao equipamento

Os valores dos deslocamentos (flechas) obtidos serão resumidos na tabela subsequente (tabela 40).

Tabela 40– Resumo das cargas e flechas de PL-01

Painel de laje PL-01 (Valores Experimentais)									
Carga	Deflet.	Transdutores			Carga	Deflet.	Transdutores		
Ptot (kN)	a2 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)	Ptot (kN)	a2 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)
0	0	0	0	0	24	3,28	3,07	3,48	2,29
1	0,09	0,12	0,22	0,04	25	3,41	3,17	3,61	2,38
2	0,19	0,31	0,34	0,16	26	3,59	3,29	3,78	2,5
3	0,28	0,43	0,44	0,22	27	3,76	3,4	3,93	2,6
4	0,38	0,55	0,53	0,29	28	3,89	3,5	4,06	2,7
5	0,5	0,71	0,66	0,37	29	4,03	3,6	4,2	2,8
6	0,63	0,87	0,78	0,45	30	4,18	3,72	4,36	2,9
7	0,74	1,03	0,9	0,54	31	4,34	3,82	4,51	3,01
8	0,86	1,19	1,03	0,63	32	4,54	3,95	4,7	3,14
10	1,15	1,57	1,33	0,82	33	4,69	4,06	4,85	3,25
11	1,32	1,8	1,51	0,93	34	4,93	4,21	5,07	3,39
12	1,39	1,89	1,59	0,98	35	5,06	4,3	5,2	3,49
13	1,47	1,97	1,68	1,05	36	5,22	4,41	5,36	3,6
14	1,55	2,03	1,75	1,1	37	5,39	4,55	5,52	3,71
15	1,65	2,11	1,84	1,17	38	5,66	4,72	5,77	3,89
16	1,86	2,22	2,05	1,31	39	5,91	4,9	6,02	4,06
17	2,04	2,33	2,23	1,44	40	6,16	5,06	6,31	4,23
18	2,33	2,52	2,54	1,64	41	6,49	5,25	6,64	4,46
19	2,5	2,62	2,69	1,74	42	6,73	5,4	6,89	4,63
20	2,66	2,72	2,86	1,86	43	7,11	5,63	7,26	4,89
21	2,82	2,84	3,03	1,98	44	7,76	6,02	7,92	5,36
22	2,96	2,93	3,16	2,07	44,5	8,3	6,3	8,42	5,71
23	3,14	2,99	3,33	2,18					

Para uma melhor visualização dos dados apresentados na tabela anterior, serão construídos os três gráficos a seguir: no primeiro deles são apresentados os valores de cargas e flechas para o defletômetro analógico (figura 175); no segundo são plotados os valores de cargas e flechas somente para os transdutores (figura 176); já no terceiro gráfico são apresentados valores comparativos entre o transdutor e o defletômetro, ambos localizados no centro da laje (figura 177).

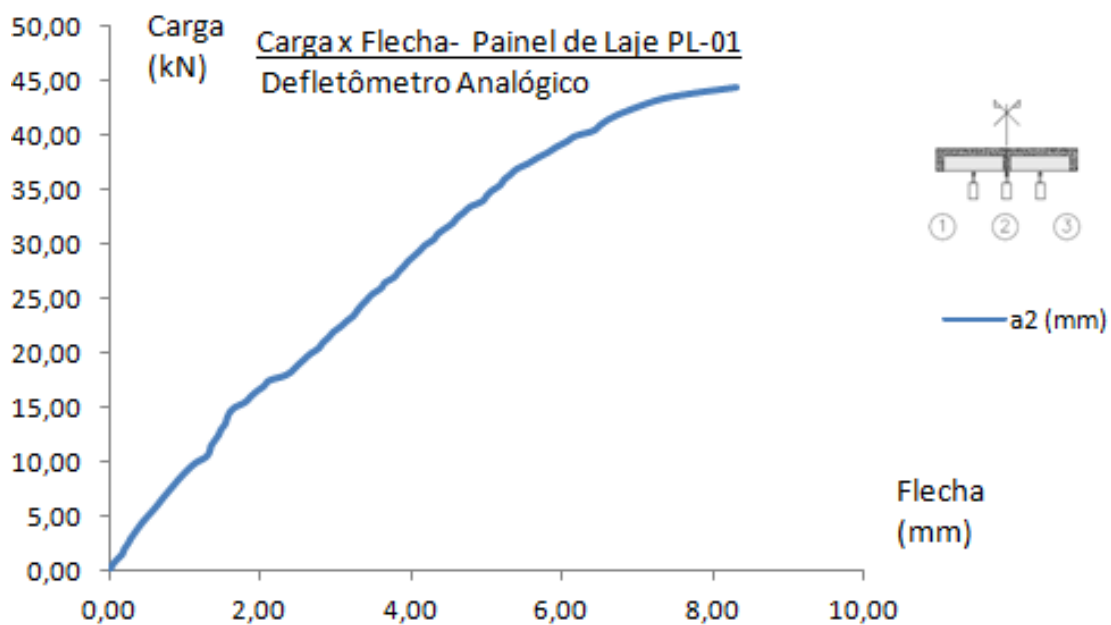


Figura 175 – Gráfico Carga x Flecha da laje PL-01, defletômetro

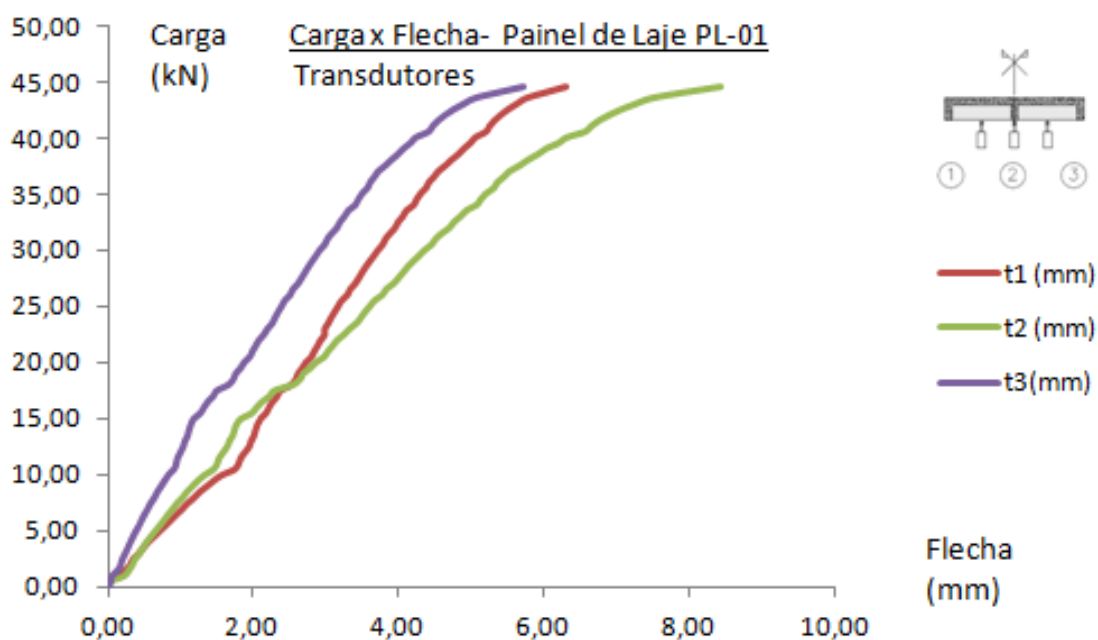


Figura 176 – Gráficos Carga x Flecha da laje PL-01, transdutores

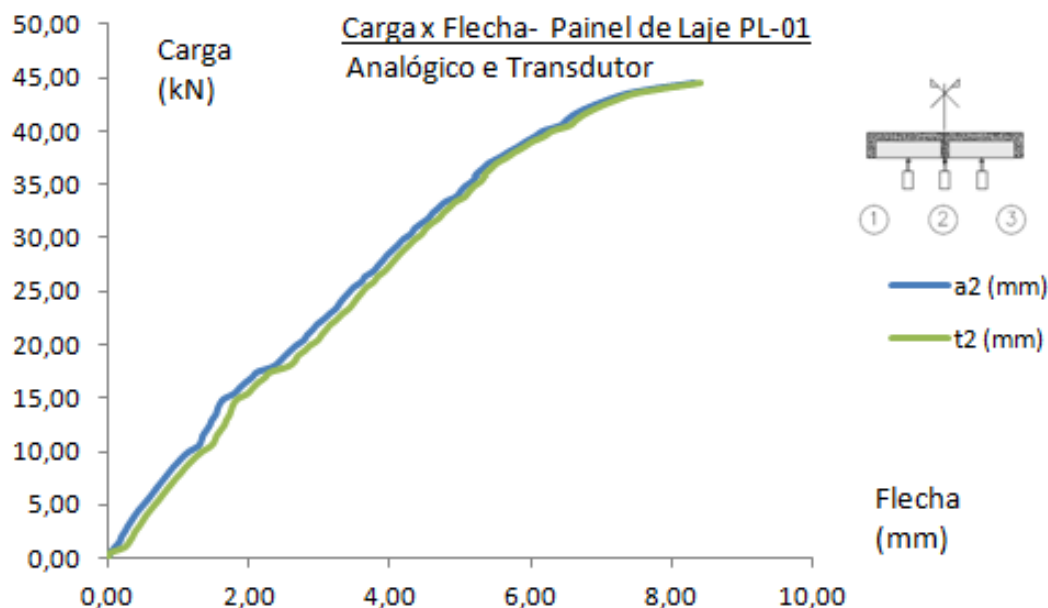


Figura 177 – Gráficos Carga x Flecha da laje PL-01, comparativo defletômetro e transdutor

4.7.2.2 Verificação das deformações de PL-01

A laje PL-02 teve suas deformações monitoradas no concreto e no aço. Esta extensimetria obedeceu a uma nomenclatura semelhante a utilizada nas peças ensaiadas anteriormente, ou seja, os cinco primeiros extensômetros estão monitorando as deformações no concreto, enquanto os três últimos monitoram as deformações no aço.

Embora sejam apresentados na tabela a seguir (tabela 42) todos os valores obtidos no ensaio de PL-01, para construção dos gráficos foram selecionados apenas parte destes dados. Ou seja, para os gráficos foram desprezados os valores repetidos ou que são consequência da paralisação do funcionamento correto dos extensômetros.

No caso da zona comprimida, os valores tomados para construção do gráfico foram até um valor de carga próximo de 45,0kN. Para a zona tracionada, os valores utilizados na construção do gráfico são próximos de 17,0kN. Essa diferença nos valores se dá por conta da abertura de fissuras na zona tracionada, uma vez que quando estas fissuras alcançam a região próxima ao extensômetro ocasionam uma paralisação ou mau funcionamento deste dispositivo .

Na tabela a seguir podem ser visualizados tracejados, representando valores não válidos. Este é o caso, por exemplo, de valores de deformações que não condizem com o comportamento conhecido do concreto.

Tabela 41– Resumo das cargas e deformações de PL-01

PL-01- Concreto, direção principal							
Carga	Compressão		Tração		Carga	Compressão	
P_{tot} (kN)	ϵ_{c1} (o/oo)	ϵ_{c2} (o/oo)	ϵ_{c3} (o/oo)	ϵ_{c4} (o/oo)	P_{tot} (kN)	ϵ_{c1} (o/oo)	ϵ_{c2} (o/oo)
0	0,0008	0,0012	0,0009	0,0013	22	-0,0733	-0,0433
1	-0,001	-0,0011	0,0035	0,0059	23	-0,0754	-0,0425
2	-0,0043	-0,0053	0,0064	0,0074	24	-0,0772	-0,0431
3	-0,006	-0,0073	0,0084	0,01	25	-0,078	-0,0411
4	-0,0077	-0,0096	0,0107	0,0127	26	-0,0794	-0,0404
5	-0,0095	-0,0114	0,0134	0,016	27	-0,0827	-0,0443
6	-0,0116	-0,0138	0,016	0,02	28	-0,0841	-0,0433
7	-0,012	-0,0131	0,0199	0,0246	29	-0,0857	-0,0447
8	-0,0138	-0,0154	0,0228	0,0285	30	-0,0871	-0,044
9	-0,0152	-0,0167	0,0251	0,0318	31	-0,0893	-0,0451
10	-0,0167	-0,0183	0,0271	0,0346	32	-0,0903	-0,0464
11	-0,019	-0,0206	0,0314	0,0399	33	-0,0911	-0,0473
12	-0,0204	-0,0226	0,0343	0,0436	34	-0,0918	-0,0481
13	-0,0237	-0,0284	0,0379	0,0471	35	-0,0929	-0,0493
14	-0,0253	-0,0302	0,0445	0,0545	37	-0,0957	-0,053
15	-0,0284	-0,0322	0,0504	0,0556	38	-0,1034	-0,0528
16	-0,034	-0,0358	0,0601	0,0594	39	-0,1152	-0,0555
17	-0,0412	-0,0393	0,0723	0,0649	40	-0,1267	-0,0568
18	-0,0589	-0,0414	--	--	41	-0,1391	-0,059
19	-0,0644	-0,0416	--	--	42	--	-0,0611
20	-0,0669	-0,0406	--	--	43	--	-0,0637
21	-0,07	-0,0415	--	--	44	--	-0,0697

Os gráficos das deformações no concreto comprimido (figura 178), e do concreto tracionado (figura 179) são apresentados a seguir. Ambos os gráficos são referentes à direção principal, ou seja, resultam dos extensômetros posicionados nas nervuras principais, referindo-se aos valores de cargas já mencionados anteriormente.

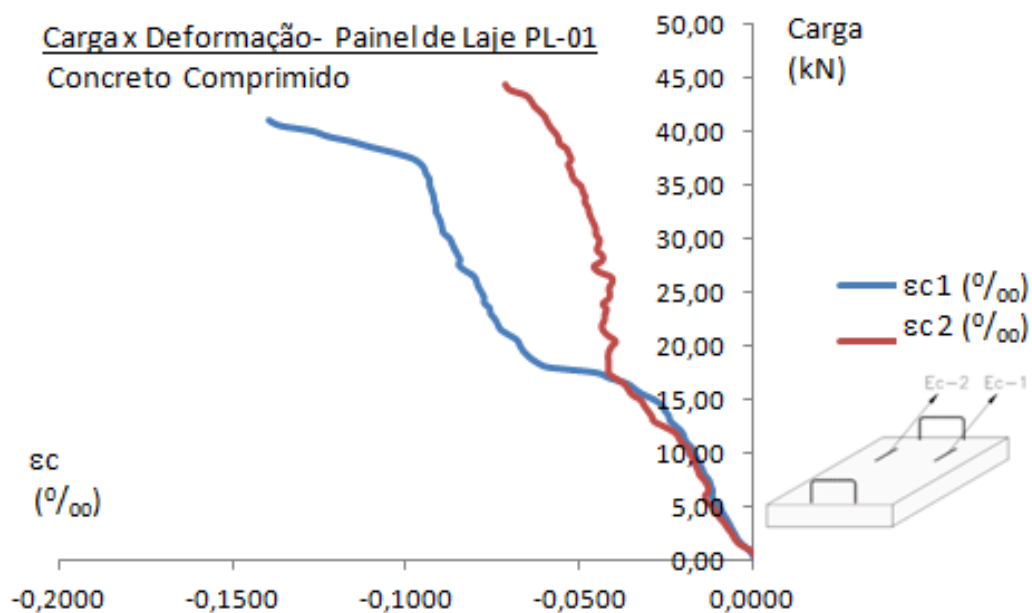


Figura 178 – Gráficos Carga x Deformação, concreto comprimido

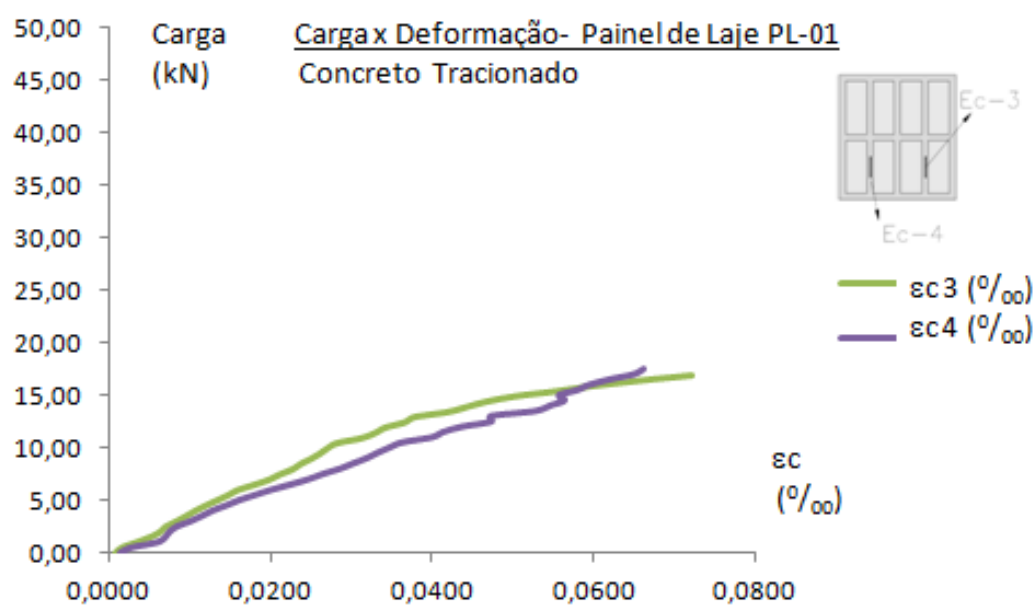


Figura 179 – Gráficos Carga x Deformação, concreto tracionado

As deformações que foram verificadas na direção secundária (nervura secundária) apresentam um comportamento bastante peculiar, pois, até valores de carga de 15,0kN os extensômetros indicam concreto tracionado; já acima dessa carga, há indicação de concreto comprimido até a ruptura da peça. Essas deformações serão apresentadas separadamente na planilha (tabela 42) e no gráfico a seguir (figura 180)

Tabela 42 – Resumo das cargas e deformações, direção secundária de PL-01

PL-01- Concreto, direção secundária			
Carga	Tração/ Compressão	Carga	Tração/ Compressão
P_{tot} (kN)	ε_{c5} ($_{0/00}$)	P_{tot} (kN)	ε_{c5} ($_{0/00}$)
0	0,001	23	-0,039
1	0,004	24	-0,038
2	0,013	25	-0,037
3	0,017	26	-0,036
4	0,022	27	-0,037
5	0,028	28	-0,036
6	0,034	29	-0,036
7	0,041	30	-0,036
8	0,047	31	-0,035
9	0,052	32	-0,031
10	0,057	33	-0,029
11	0,062	34	-0,033
12	0,052	35	-0,034
13	0,037	36	-0,037
14	0,029	37	-0,04
15	0,014	38	-0,043
16	-0,018	39	-0,047
17	-0,024	40	-0,052
18	-0,034	41	-0,058
19	-0,037	42	-0,062
20	-0,037	43	-0,067
21	-0,039	44	-0,071
22	-0,039	44,5	-0,071

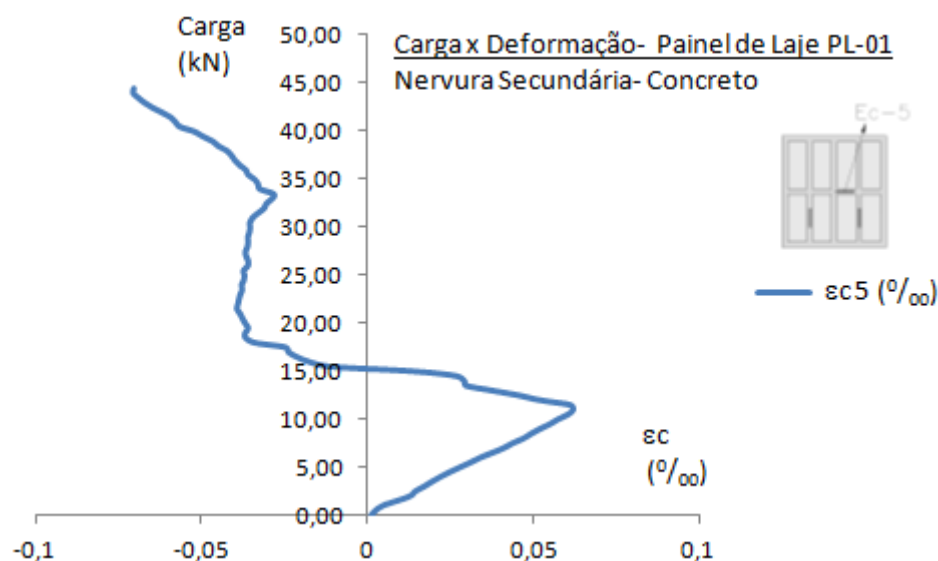


Figura 180 – Gráfico Carga x Deformação, na nervura secundária de PL-01

Para monitorar as deformações nas armaduras principais foram utilizados três extensômetros. Eles foram denominados respectivamente de E_s-6 , E_s-7 e E_s-8 , conseqüentemente, fornecendo as deformações ϵ_{s6} , ϵ_{s7} e ϵ_{s8} . A maior parte dos extensômetros não funcionou até o término do ensaio de PL-01, ou seja, os extensômetros tiveram uma carga máxima de funcionamento bastante diversificada.

Apenas o extensômetro E_s-6 apresentou resultados de deformação para carga de 38,0 kN, os demais (E_s-7 e E_s-8) apresentaram resultados para cargas de 28,0kN e 19kN, respectivamente. A partir do momento em que um extensômetro para de funcionar, em alguns casos, os valores obtidos através dele não são condizentes com valor possível de deformação para o material que está sendo monitorado.

Nestes casos, optou-se pela não apresentação destes números na planilha, onde são apresentados apenas os valores de deformações considerados compatíveis com o tipo de aço utilizado na confecção das armaduras. Também os gráficos foram construídos apenas para estes valores válidos de deformação.

Objetivando um resumo das deformações obtidas através dos extensômetros situados na armadura principal, foi elaborada a tabela a seguir (tabela 43).

Tabela 43– Resumo das cargas e deformações na armadura (direção principal) de PL-01

PL-01- Aço, direção principal(Nervura Principal)						
Carga	Tração			Carga	Tração	
Ptot (kN)	ϵ_{s6} (0/00)	ϵ_{s7} (0/00)	ϵ_{s8} (0/00)	Ptot (kN)	ϵ_{s6} (0/00)	ϵ_{s7} (0/00)
0	0,0007	0,0012	0,0004	23	1,003	0,8439
1	0,0031	0,0029	0,0018	24	1,0735	0,9029
2	0,0028	0,0043	0,0032	25	1,1313	0,9528
3	0,0039	0,0052	0,0041	26	1,2047	0,8053
4	0,0053	0,0068	0,0055	27	1,2657	0,219
5	0,007	0,0086	0,0071	28	1,323	0,0274
6	0,0086	0,0104	0,0086	29	1,3806	--
7	0,0122	0,0137	0,0116	30	1,4429	--
8	0,0145	0,0156	0,0135	31	1,5043	--
9	0,0166	0,0173	0,0157	32	1,5824	--
10	0,0185	0,0188	0,0178	33	1,6382	--
11	0,0216	0,0218	0,0203	34	1,7041	--
12	0,0237	0,0237	0,0226	35	1,7521	--
13	0,0243	0,0252	0,0238	36	1,8045	--
14	0,0277	0,0298	0,0282	37	1,8542	--
15	0,0282	0,0337	0,0307	38	1,916	--
16	0,0349	0,0406	0,0553	39	--	--
17	0,0491	0,0526	0,2261	40	--	--
18	0,5308	0,3928	0,3252	41	--	--
19	0,65	0,5008	0,287	42	--	--
20	0,7699	0,6468	--	43	--	--
21	0,8583	0,7334	--	44	--	--
22	0,9212	0,7861	--		--	--

No gráfico a seguir (figura 181) são representadas as deformações dos três extensômetros instalados no aço da armadura principal, mas apenas, até valores de carga em que todos estes dispositivos apresentaram leituras de deformações compatíveis com o aço tracionado. Posteriormente será apresentado o gráfico somente para o extensômetro E_{s-6} , cujo funcionamento alcançou a maior carga (figura 182).

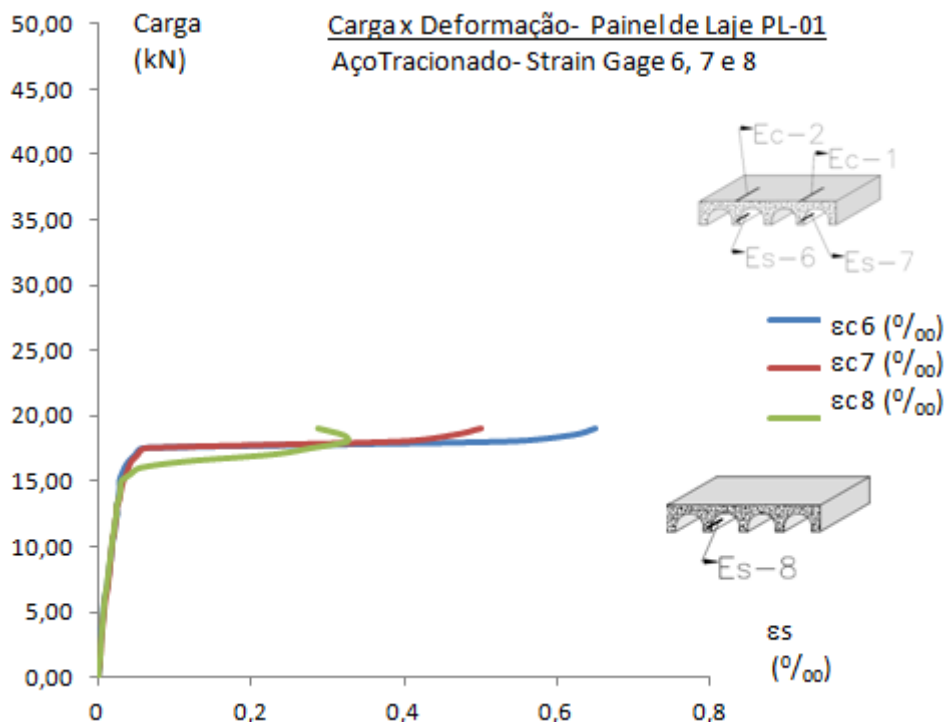


Figura 181 – Gráficos Carga x Deformação, aços na nervura principal de PL-01

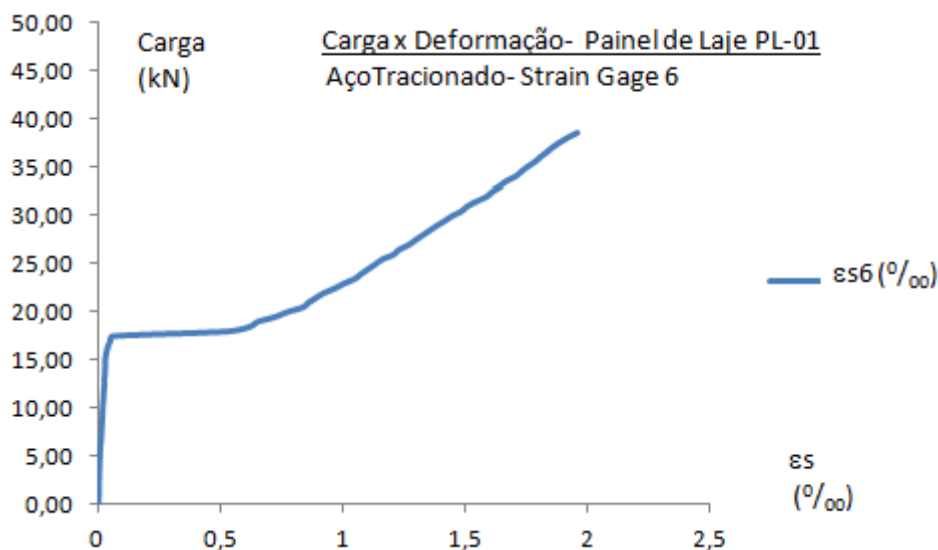


Figura 182 – Gráfico Carga x Deformação, aços na nervura principal de PL-01

Cabe ressaltar que tanto nos gráficos “Carga x Flecha”, quanto nos “Carga x Deformação” de concreto e aço ocorre uma inflexão nas curvas para um valor de carga de 15,0 kN. Esta inflexão representa o início da fissuração da peça e uma consequente mudança em sua rigidez. Além disso, nessa carga ocorreu a transição da peça do Estádio I para o Estádio II (peça fissurada).

4.7.2.3 Observação das fissuras de PL-01

O aparecimento das primeiras fissuras em PL-01 deu-se para uma carga de 12,50kN, na região próxima ao transdutor três, na nervura principal. O detalhe da primeira fissura visualizada na parte inferior da laje aparece assinalado na foto a seguir (figura 183).



Figura 183 – Detalhe da 1ª fissura de PL-01

As fissuras seguintes apareceram na superfície lateral da laje, só se tornaram visíveis para uma carga de 20,0kN. A foto a seguir (figura 184) mostra as fissuras que surgiram na lateral da laje, estando numeradas por ordem de aparecimento.

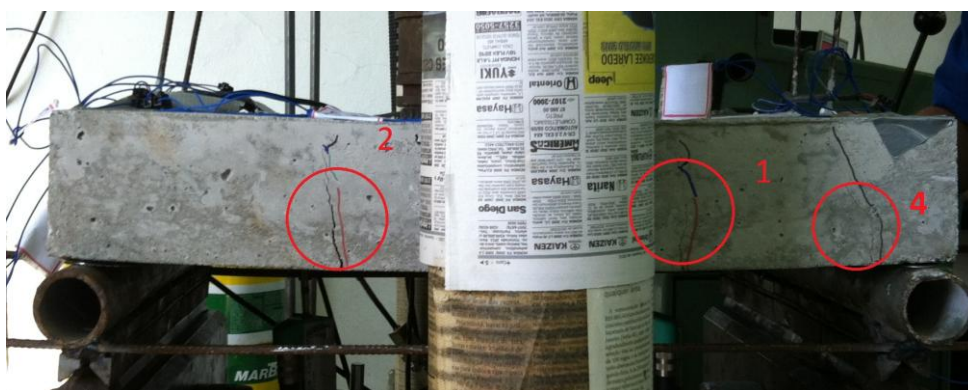


Figura 184 – Detalhe do 1º, 2º e 4º tipos de fissuras de PL-01

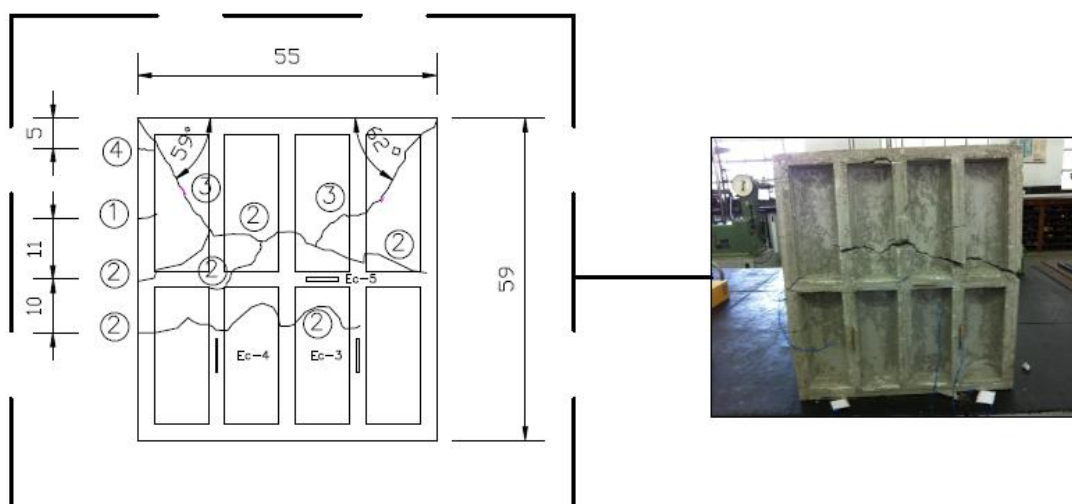
Na planilha a seguir (tabela 44) estão resumidas as principais informações sobre as fissuras de PL-01, incluindo sua carga de surgimento e organizadas por ordem de aparecimento.

Tabela 44– Cargas e ordem de aparecimento das fissuras de PL-01

Carga de surgimento (kN)	Nº. de Identificação	Localização	Abertura máxima (mm)
12,50	0	Nervura Principal	--*
20,00	1	Lateral da laje (a 11,0 cm do eixo da laje)	1,2
20,30	2	Lateral da laje (a 10,0 cm do eixo da laje)	1,2
25,50	2	Nervura Secundária	--*
33,50	3	Parte superior/inferior da laje a aprox. 60° com o menor lado	0,4
40,10	4	Lateral da laje (a 5,0 cm do apoio)	0,4

* Obs: Devido a localização de algumas fissuras, não foi possível monitorar sua abertura

As fissuras que são bastante características de uma laje apareceram para uma carga de 33,50 kN, formando com o bordo apoiado (menor lado) um ângulo de aproximadamente 60°. Estes ângulos de fissuras estão de acordo com o tipo de apoio dos bordos da laje. Para um melhor entendimento sobre como se deu a fissuração de PL-01 foi elaborada a figura a seguir (figura 185).

**Figura 185 – Detalhe dos posicionamentos de fissuras de PL-01**

A foto a seguir (figura 186) e apresenta, assinalado em vermelho, o aspecto das fissuras denominadas como número dois, ao longo de várias nervuras principais.



Figuras 186 – Detalhe de fissuras ao longo das nervuras principais de PL-01

4.7.2.4 Ruptura de PL-01

A ruptura do painel de laje PL-01 ocorreu para uma carga de 44,90kN. Estando as fissuras atravessando a totalmente a laje (figura 187, detalhe superior). A ruptura dessa laje deu-se com o esmagamento do concreto na zona comprimida, mas, não houve ruptura do aço das armaduras na zona tracionada. Nesta fase final do ensaio, as fissuras que se iniciaram na lateral da laje alcançaram a parte superior da peça (figura 187, detalhe inferior).

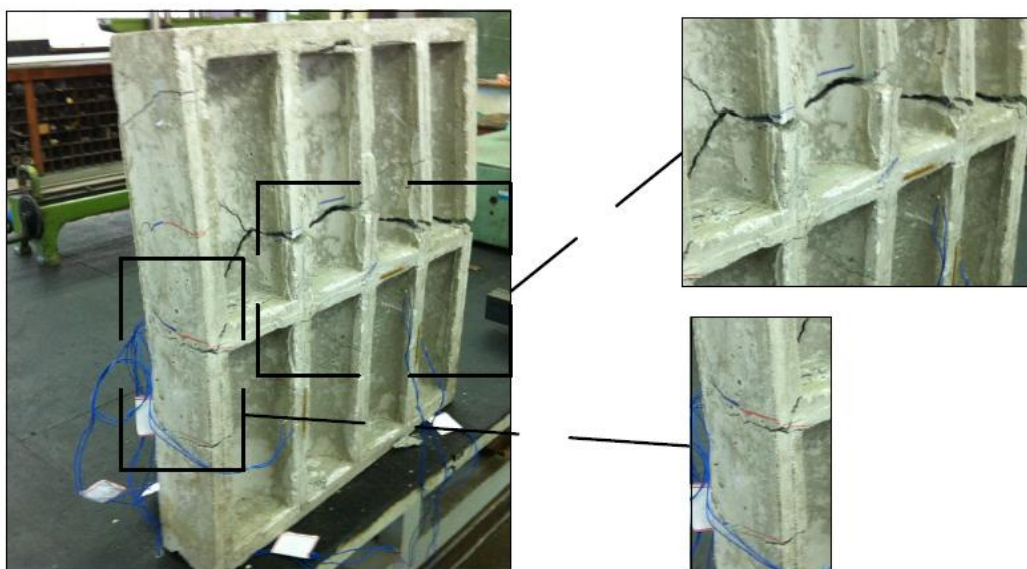


Figura 187 – Detalhe da ruptura na parte inferior de PL-01

A parte superior do painel de laje em questão apresentou fissuras na mesa das nervuras que se uniram as fissuras que surgiram na lateral. Não foram constadas fissuras e nem esmagamento de concreto, causados pela aplicação centralizada da carga (efeito da punção), conforme pode ser visualizado na figura e detalhe a seguir (figura 188).

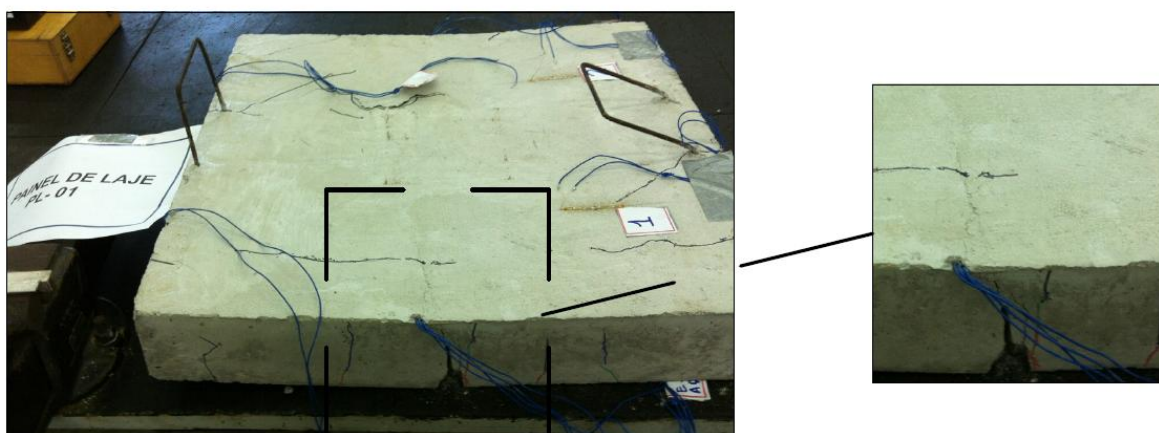


Figura 188 – Detalhe da ruptura na parte superior de PL-01

4.7.3 Ensaio de PL-02

Para realização do ensaio de PL-02, confeccionou-se um quadro similar ao apresentado nas fotos da laje anterior, somente tendo como diferença as dimensões entre os apoios. Este quadro era sobreposto aos apoios originais da prensa, de forma idêntica ao utilizado no item anterior, conforme o apresentado nas figuras a seguir (figuras 189 e 190).



Figura 189 – Aspecto de PL-02 posicionada para o ensaio- vista frontal



Figura 190 – Aspecto de PL-02 posicionada para o ensaio- vista lateral

4.7.3.1 Verificação das flechas de PL-02

Para uma medição dos deslocamentos (flechas) do painel de laje PL-02, foram utilizados três transdutores e três defletômetros analógicos, cujas posições já foram apresentadas em itens anteriores. Seguindo os procedimentos dos ensaios anteriores, estes equipamentos foram mantidos até um patamar de carga em que o estado de fissuração da peça poderia ocasionar danos aos mesmos, procedendo-se a sua retirada.

O aspecto dos defletômetros e dos transdutores de PL-02, já posicionados para o ensaio serão apresentados na foto a seguir (figura 191).

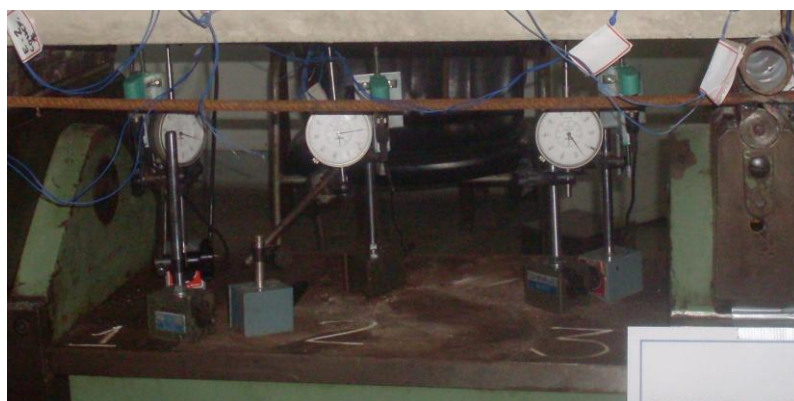


Figura 191 – Aspecto dos transdutores e defletômetros de PL-02

Os valores dos deslocamentos (flechas) que foram verificados para PL-02 serão apresentados na planilha a seguir (tabela 45).

Tabela 45– Resumo das cargas e flechas PL-02

Painel de laje PL-02 (Valores Experimentais)													
Carga	Deflet. Analógicos			Transdutores			Carga	Deflet. Analógicos			Transdutores		
P _{tot} (kN)	a1 (mm)	a2 (mm)	a3 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)	P _{tot} (kN)	a1 (mm)	a2 (mm)	a3 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)
0	0	0	0	0	0	0	17	3,11	4,99	3,24	2,66	5,15	2,3
1	0,11	0,1	0,06	0,12	0,1	0,01	18	3,82	5,84	3,85	3,35	6,02	2,7
2	0,18	0,2	0,14	0,18	0,2	0,09	19	4,07	6,24	4,09	3,51	6,43	2,9
3	0,3	0,3	0,22	0,33	0,33	0,17	20	4,27	6,59	4,33	3,67	6,81	3
4	0,44	0,4	0,32	0,48	0,45	0,25	21	4,49	7,05	4,61	3,85	7,25	3,2
5	0,54	0,5	0,39	0,58	0,54	0,32	22	4,68	7,4	4,85	4,01	7,63	3,4
6	0,6	0,6	0,44	0,66	0,62	0,37	23	4,89	7,79	5,1	4,18	8,03	3,5
7	0,68	0,7	0,49	0,75	0,71	0,41	24	5,11	8,21	5,36	4,36	8,45	3,7
8	1	1,2	0,78	1	1,26	0,62	25	5,38	8,7	5,68	4,57	8,95	4
9	1,39	1,9	1,29	1,28	2,03	0,92	26	5,7	9,24	6,01	4,79	9,49	4,2
10	1,58	2,3	1,52	1,45	2,42	1,09	27	6,04	9,93	6,4	5,06	10,1	4,4
11	1,8	2,7	1,74	1,6	2,78	1,24	28	6,52	10,8	6,96	5,42	11,1	4,8
12	2,02	3,1	1,99	1,76	3,19	1,42	29	6,97	11,6	7,43	5,75	11,9	4,9
13	2,21	3,4	2,21	1,93	3,53	1,56	30	7,54	12,7	8,14	6,17	13,1	5,3
14	2,4	3,8	2,44	2,09	3,9	1,72	31	8,54	14,9	9,44	7,01	15,3	6
15	2,62	4,2	2,68	2,25	4,29	1,88	32	9,96	17,7	11,1	8,08	18,2	7
16	2,85	4,5	2,92	2,43	4,67	2,05	OBS: Transdutores retirados para carga de 32,25 kN						

Para uma melhor visualização dos dados apresentados na tabela anterior, serão construídos os três gráficos a seguir: no primeiro deles são apresentados os valores de cargas e flechas para os defletômetros analógicos (figura 192); no segundo são plotados os valores de cargas e flechas somente para os transdutores (figura 193); já no terceiro gráfico são apresentados valores comparativos entre os transdutores e o defletômetros, localizados ao lado um do outro (figura 194).

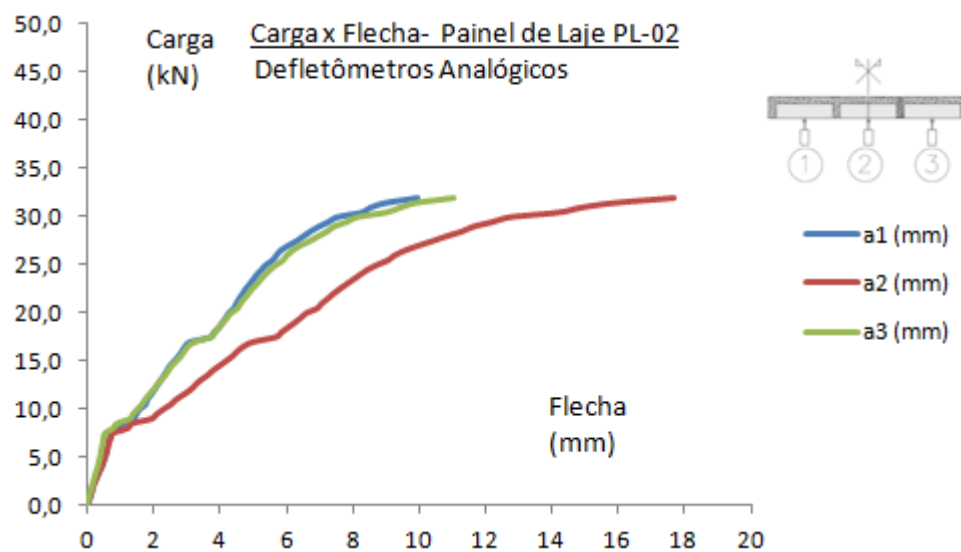


Figura 192 – Gráficos Carga x Flecha da laje PL-02, defletômetros

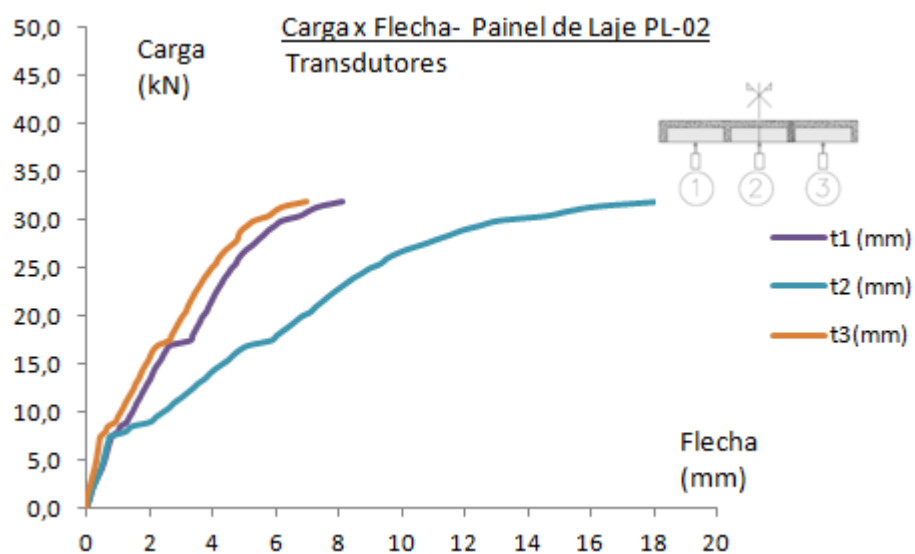


Figura 193 – Gráficos Carga x Flecha da laje PL-02, transdutores

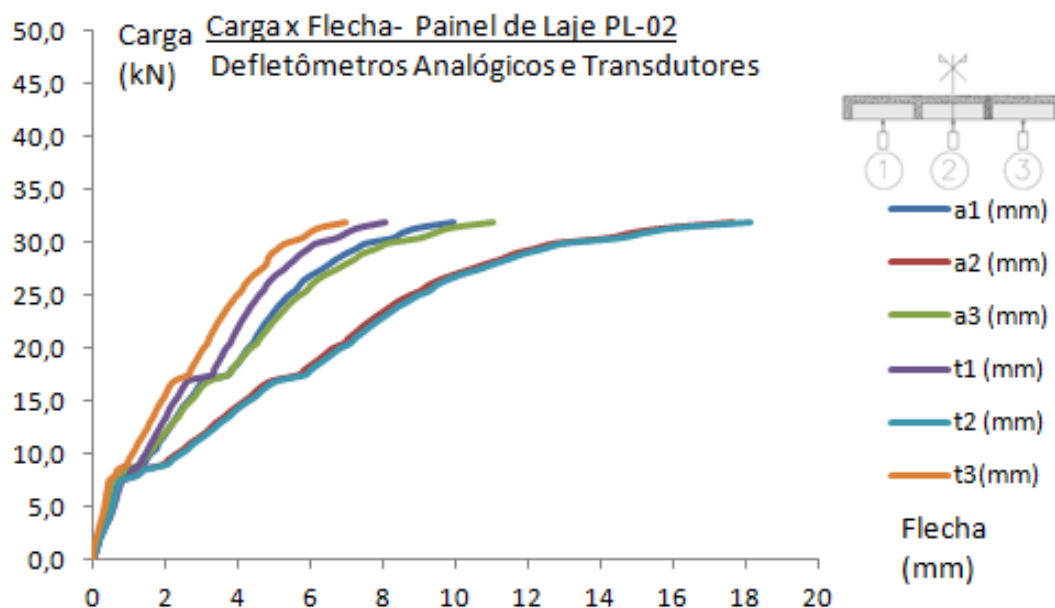


Figura 194 – Gráficos Carga x Flecha da laje PL-02, defletômetros e transdutores

4.7.3.2 Verificação das deformações de PL-02

A laje PL-02 teve suas deformações monitoradas no concreto e no aço. Nesta extensimetria os cinco primeiros extensômetros estão monitorando as deformações no concreto, enquanto os três últimos monitoram as deformações no aço.

Embora estivessem localizados em posições simétricas na zona comprimida, os extensômetros E_c-1 e E_c-2 apresentaram comportamento bastante distinto, tanto do ponto de vista das deformações registradas quanto das cargas máximas alcançadas por estes dispositivos. No caso de E_c-1 as deformações foram da ordem de $-0,045 \text{ ‰}$, para carga de 25,0 kN. O extensômetro E_c-2 as apresentou a mesma deformação, porem, para uma carga de 14,0 kN.

No caso da zona tracionada, os valores verificados foram até um valor de carga de 10,0kN, e até esse valor os extensômetros E_c-3 e E_c-4 apresentaram valores de deformações bastante próximos. Acima desta carga, estes extensômetros não apresentaram um bom funcionamento.

A diferença nos valores de carga máxima alcançada pelos extensômetros se dá por conta da abertura de fissuras na zona tracionada. Quando estas fissuras alcançam a região próxima ao extensômetro ocasionam uma paralisação ou mau

funcionamento deste dispositivo, que passa a apresentar valores não compatíveis com o comportamento do concreto.

Na tabela a seguir são apresentados os valores de cargas e deformações verificados no concreto da nervura principal, nas zonas tracionada e comprimida (tabela 46).

Tabela 46–Cargas e deformações no concreto de PL-02, direção principal

PL-02- Concreto, direção principal							
Carga	Compressão		Tração		Carga	Compressão	
Ptot (kN)	ϵ_{c1} (0/00)	ϵ_{c2} (0/00)	ϵ_{c3} (0/00)	ϵ_{c4} (0/00)	Ptot (kN)	ϵ_{c1} (0/00)	ϵ_{c2} (0/00)
0	-0,0012	-0,0005	0,0001	0,0001	13	-0,0152	-0,0431
1	-0,0007	-0,0116	0,0065	0,0088	14	-0,0173	-0,0455
2	-0,0003	-0,0128	0,0094	0,0118	15	-0,0191	--
3	0,0001	-0,0157	0,0132	0,0162	16	-0,0208	--
4	-0,0016	-0,0177	0,0164	0,0195	17	-0,0227	--
5	-0,0034	-0,0199	0,0194	0,0226	18	-0,0294	--
6	-0,0048	-0,0216	0,0219	0,0255	19	-0,0332	--
7	-0,0061	-0,0234	0,0257	0,0291	20	-0,0376	--
8	-0,0099	-0,026	0,0322	0,0346	21	-0,0384	--
9	-0,0107	-0,0299	0,0355	0,0399	22	-0,0405	--
10	-0,0135	-0,0296	0,0339	0,0398	23	-0,0416	--
11	-0,0136	-0,0393	--	--	24	-0,0435	--
12	-0,0141	-0,0411	--	--	25	-0,045	--

Para uma visualização dos valores resumidos na tabela , foram construídos os gráficos apresentados a seguir (figuras 195 e 196). Nestes gráficos são resumidos os dados de extensômetros localizados em posição simétrica, para a zona comprimida e zona tracionada.

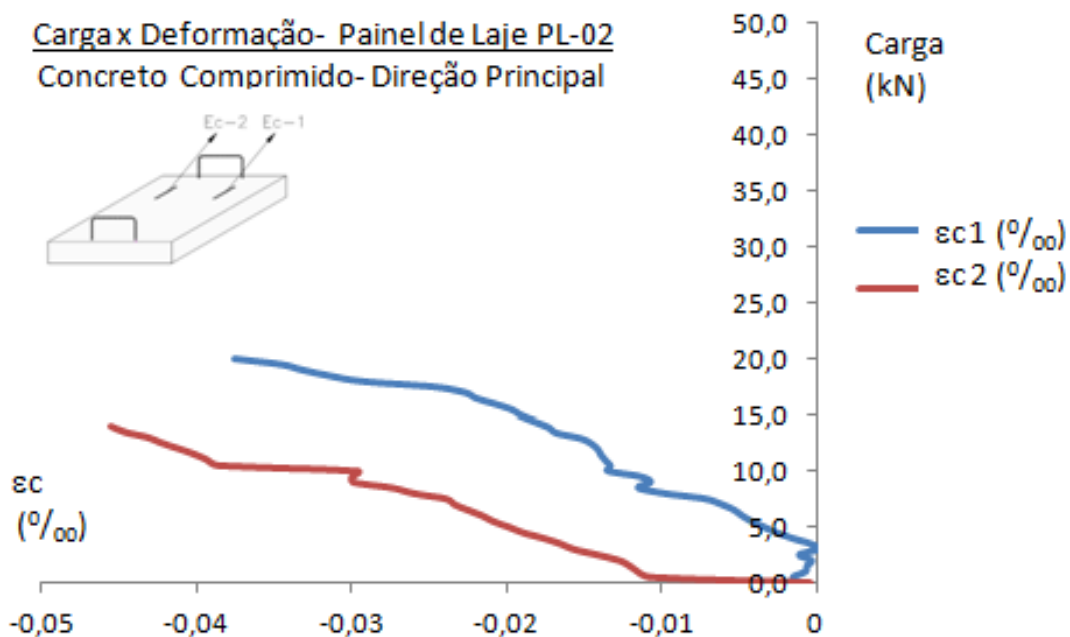


Figura 195 – Gráficos Carga x Deformação, concreto comprimido

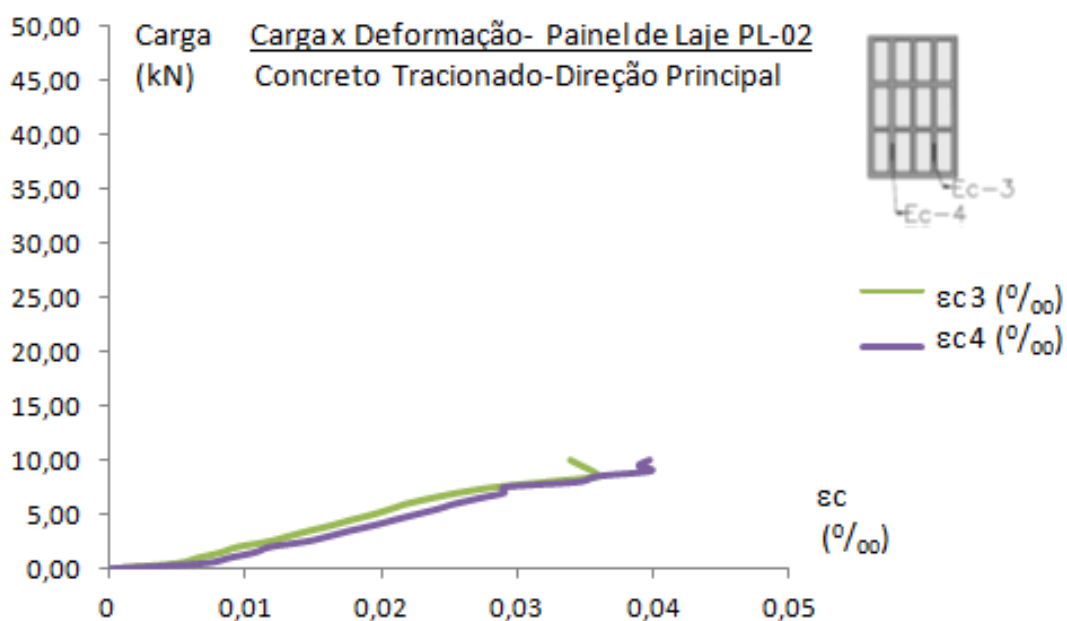


Figura 196 – Gráficos Carga x Deformação, concreto tracionado

Assim como no painel de laje anterior, as deformações que foram verificadas na direção secundária (nervura secundária) apresentam um comportamento bastante peculiar, pois, até valores de carga de 8,50 kN, os extensômetros indicaram concreto tracionado; já acima dessa carga, há indicação de concreto comprimido até a ruptura da peça. Essas deformações serão apresentadas separadamente na planilha (tabela 47) e no gráfico a seguir (figura 197).

Tabela 47– Cargas e deformações no concreto, direção secundária de PL-02

PL-02- Concreto, direção secundária			
Carga	Tração/ Compressão	Carga	Tração/ Compressão
P_{tot} (kN)	ε_{c5} ($^{\circ}/_{\infty}$)	P_{tot} (kN)	ε_{c5} ($^{\circ}/_{\infty}$)
0	0,0085	8	0,4963
1	1,1262	9	-0,0845
2	1,0954	10	-0,0417
3	1,0903	11	-0,1817
4	1,0867	12	-0,1219
5	1,084	13	-0,0731
6	1,0819	14	-0,0793
7	1,0789	15	-0,0548

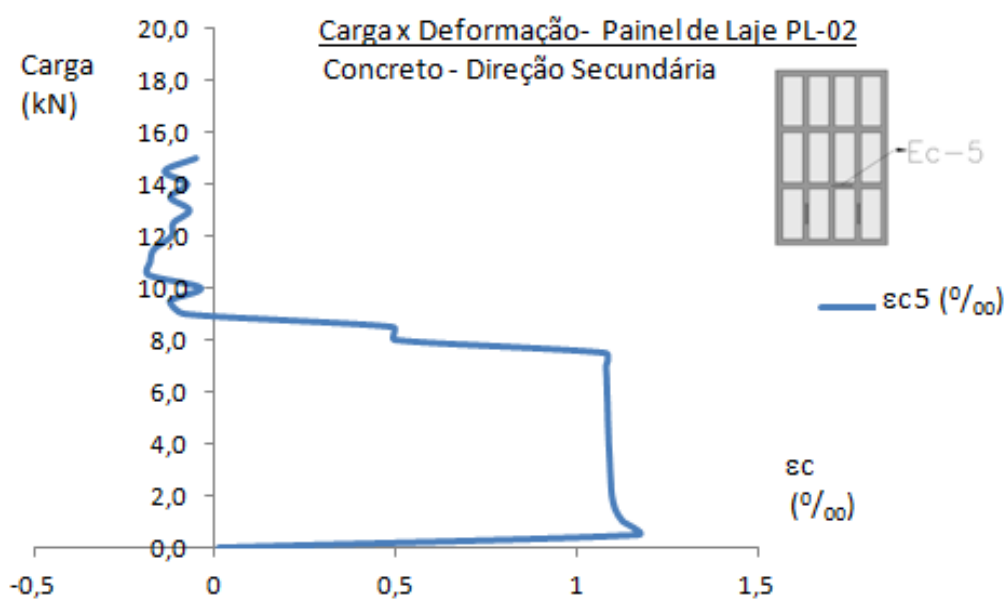


Figura 197 – Gráfico Carga x Deformação no concreto, nervura secundária

Serão agrupados na planilha a seguir (tabela 48) os valores de deformações dos extensômetros localizados na armadura principal (nervura principal). Em seguida são construídos os seguintes gráficos: para os strain gages que estavam na mesma barra, mas em lados opostos da laje (E_s-6 e E_s-8) (figura 198); para os três strain gages (E_s-6 , E_s-7 e E_s-8), localizados na armadura principal (figura 199).

Tabela 48 – Cargas e deformações no aço, direção principal de PL-02

PL-02- Aço, direção principal							
Carga	Tração			Carga	Tração		
P_{tot} (kN)	$\epsilon_{s6(0/00)}$	$\epsilon_{s7(0/00)}$	$\epsilon_{s8(0/00)}$	P_{tot} (kN)	$\epsilon_{s6(0/00)}$	$\epsilon_{s7(0/00)}$	$\epsilon_{s8(0/00)}$
0,00	0,0005	0,0007	0,0003	17,00	0,5689	0,4619	0,4807
1,00	0,0035	0,0045	0,0018	18,00	0,7242	0,5355	0,5695
2,00	0,005	0,0062	0,0028	19,00	0,851	0,6031	0,6235
3,00	0,0068	0,0082	0,0039	20,00	0,999	0,6655	0,6736
4,00	0,0086	0,0096	0,0048	21,00	1,1264	0,7319	0,7284
5,00	0,0102	0,0116	0,0057	22,00	1,369	0,7818	0,7718
6,00	0,0114	0,0127	0,0064	23,00	--	0,8349	0,8186
7,00	0,013	0,0148	0,0074	24,00	--	0,8882	0,8669
8,00	0,0213	0,0185	0,0086	25,00	--	0,9489	0,9203
9,00	0,084	0,0323	0,0106	26,00	--	1,0174	0,931
10,00	0,1445	0,091	0,0142	27,00	--	1,1645	--
11,00	0,1954	0,1332	0,0473	28,00	--	1,3321	--
12,00	0,2455	0,1834	0,1288	29,00	--	1,4087	--
13,00	0,2873	0,2264	0,1929	30,00	--	1,4731	--
14,00	0,3415	0,2773	0,2626	31,00	--	1,6635	--
15,00	0,4159	0,3405	0,3336	32,00	--	1,738	--
16,00	0,4744	0,3972	0,3954	--	--	--	--

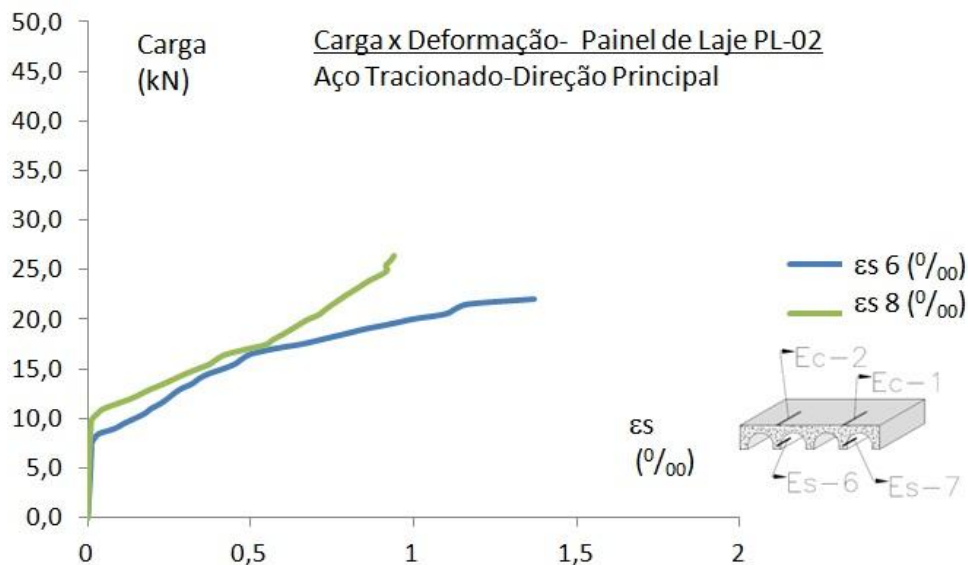


Figura 198 – Gráfico Carga x Deformação aço tracionado de PL-02

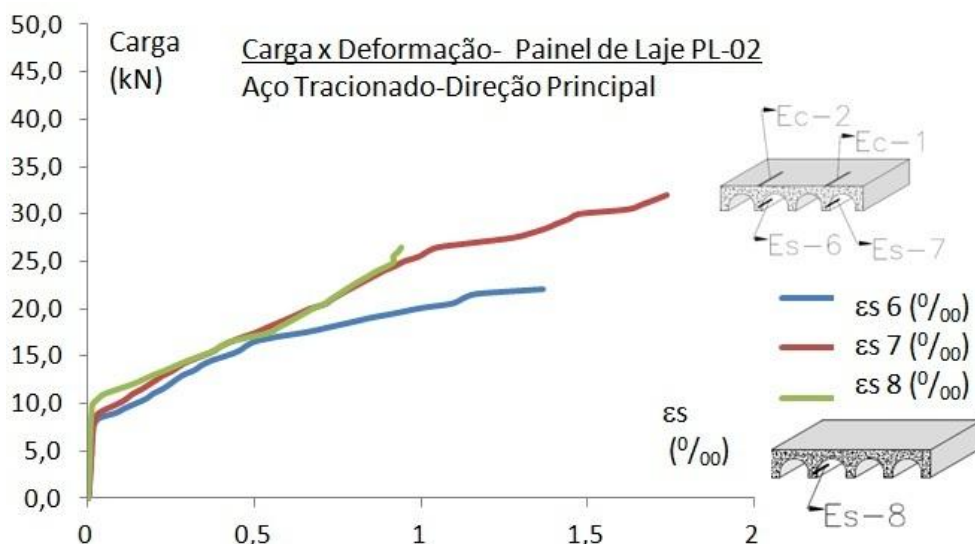
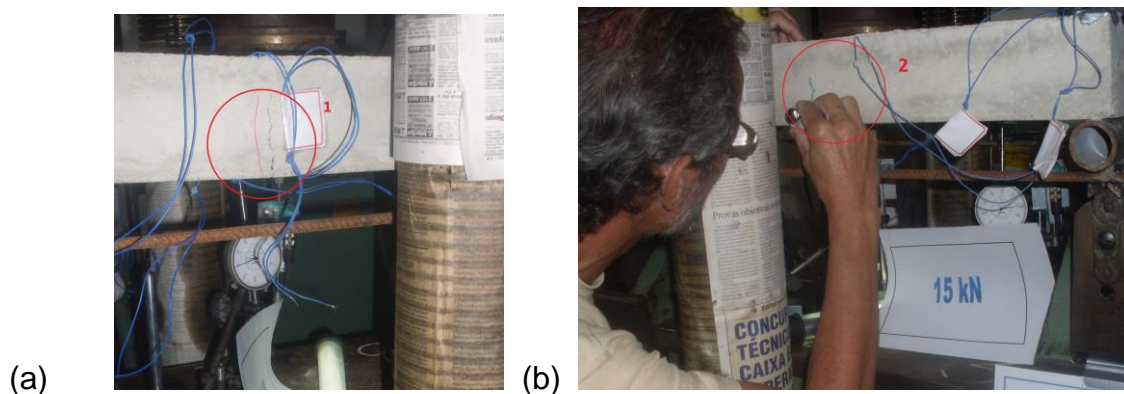


Figura 199 – Gráfico Carga x Deformação aço tracionado – todos os extensômetros

Assim como no painel de laje anterior, convém ressaltar que tanto nos gráficos “Carga x Flecha”, quanto nos “Carga x Deformação” de concreto e aço ocorre uma inflexão nas curvas para um valor de carga de 8,50 kN. Esta inflexão representa o início da fissuração da peça e uma conseqüente mudança em sua rigidez. Também, nessa carga ocorreu a transição da peça do Estádio I para o Estádio II (peça fissurada).

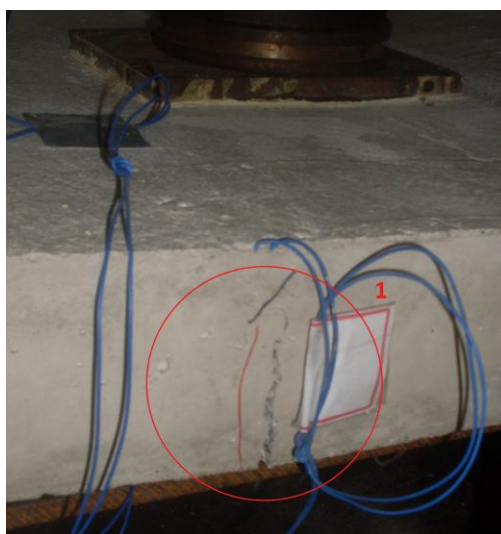
4.7.3.3 Observação das fissuras de PL-02

O aparecimento das primeiras fissuras em PL-02 deu-se para uma carga de 8,50 kN, na região lateral da laje. O aspecto dessas primeiras fissuras que surgiram é apresentado na foto a seguir (figura 200 “a” e “b”). Do lado direito, circulado a primeira fissura (fissura 1); a esquerda, circulado a segunda fissura (fissura 2).



Figuras 200 – (a) Aspecto da 1ªfissura; (b) Aspecto da 2ªfissura.

As fissuras de número um e dois foram monitoradas até uma carga de 16,0 kN. O aspecto da abertura da fissura número um, para uma carga de 30,0kN é apresentado na figura a seguir (figura 201).



Figuras 201 – Detalhe da fissura nº1, para uma carga de 30kN.

Um resumo das principais informações a respeito das fissuras de PL-02 será apresentado na planilha a seguir (tabela 49).

Tabela 49– Resumo das cargas e aberturas de fissuras de PL-02

Carga de surgimento (kN)	Nº. de Identificação	Localização	Abertura máxima (mm)
8,50	1	Lateral da laje (12 cm do centro)	1,5
8,50	2	Lateral da laje (12 cm do centro)	1,5
10,00	3	Lateral da laje (centro)	1,2
12,50	4	Parte superior da laje a aprox. 65° com o menor lado	0,2
13,50	5	Parte superior da laje a aprox. 69° com o menor lado	0,2

Para uma melhor visualização da posição de cada fissura que foi apresentada na tabela anterior, foi elaborada a figura a seguir (figura 202). Nesta figura são apresentados as posições e os ângulos de cada fissura.

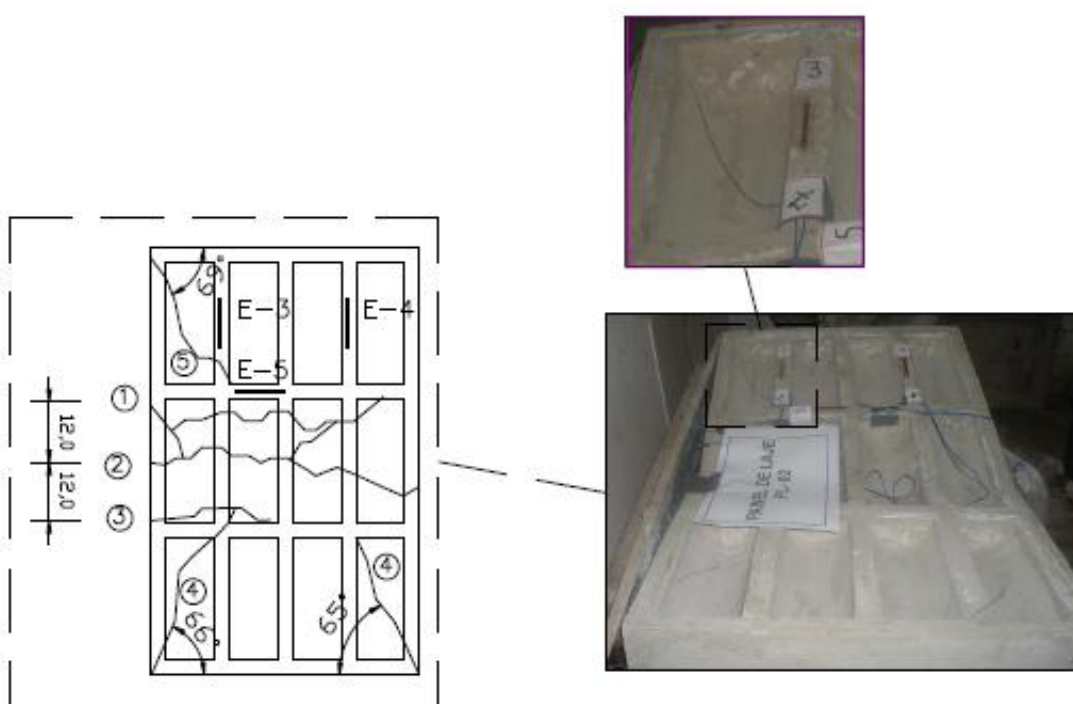


Figura 202 – Detalhe dos posicionamentos de fissuras de PL-02

4.7.3.4 Ruptura de PL-02

A ruptura do painel de laje PL-02 ocorreu para uma carga de 32,20 kN (figura 203). Nesta etapa final do ensaio ocorreu o esmagamento do concreto na zona comprimida, havendo ruptura do aço das armaduras na zona tracionada.



Figura 203 – Aspecto geral de PL-02 após a ruptura.

As fissuras que se iniciaram na lateral da laje alcançaram a parte superior da peça. Ocorreu fratura total e divisão da peça em duas partes, na região da fissura identificada com o número dois, conforme o mostrado na foto e no detalhe a seguir (figura 204).

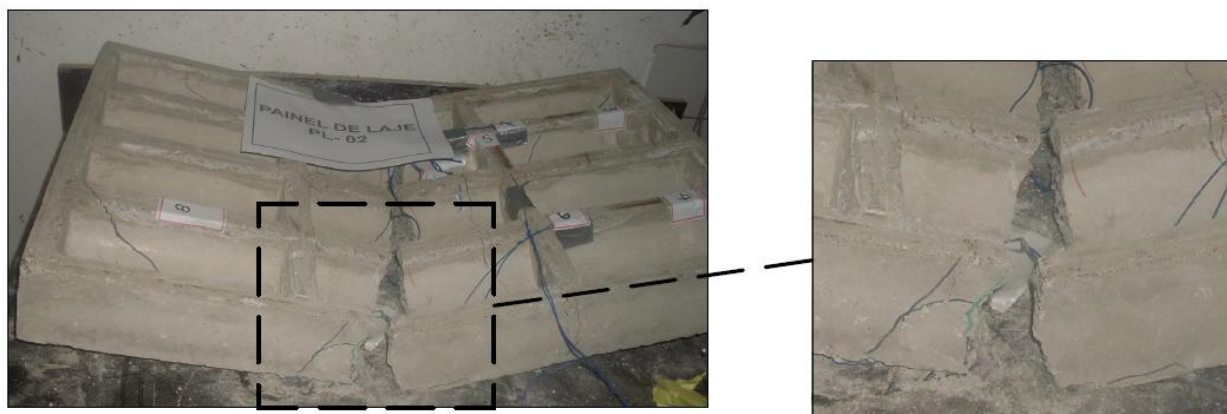


Figura 204 – Aspecto da parte inferior de PL-02 após a ruptura.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

5.1 Verificação da influência da tubulação inserida na mesa

Os modelos de viga V-1 e V-2A possuíam a mesma armadura, tendo como diferença a presença de tubulação (conduíte) inserido ao longo da mesa. Este conduíte foi inserido em V-2A, com o objetivo de estudar-se a influência da presença de uma tubulação neste modelo de laje que possui uma mesa esbelta ($h_f = 4\text{cm}$).

Ao comparar-se os deslocamentos (flechas) obtidos nos ensaios das duas vigas foi possível obter os seguintes resultados:

- Para o concreto no Estádio I (concreto não fissurado), a viga V-2A que possuía conduíte apresentou maiores deslocamentos que a viga V-1 (tabela 50);
- Após a fissuração, a viga V-1 que não possuía conduíte apresentou deslocamentos maiores que a viga V-2A (tabela 50);

Tabela 50 – Comparativo entre V-1 e V-2A (viga com e sem tubulação)

Carga	Viga V-1 (sem conduite na mesa)			Viga V-2A (com conduite na mesa)		
	P_{tot} (kN)	$a_{1\ v1}$ (mm)	$a_{2\ v1}$ (mm)	$a_{3\ v1}$ (mm)	$a_{1\ v2A}$ (mm)	$a_{2\ v2A}$ (mm)
0	0	0	0	0	0	0
1	0,09	0,11	0,08	0,16	0,15	0,12
2	0,24	0,26	0,23	0,45	0,44	0,39
3	0,35	0,39	0,35	0,73	0,74	0,66
4	0,445	0,5	0,45	1,03	1,04	0,95
5	0,6	0,67	0,61	1,37	1,41	1,28
6	1,31	1,5	1,3	1,66	1,72	1,55
7	2,54	2,72	2,49	2,19	2,27	2,07
8	3,33	3,65	3,3	2,91	3,03	2,75
9	4,28	4,73	4,29	3,62	3,82	3,49
10	5,08	5,63	5,1	4,35	4,57	4,18
11	5,83	6,48	5,85	5,19	5,43	5,00
12	6,78	7,49	6,76	5,94	6,27	5,72

- O aparecimento das primeiras fissuras ocorreu para cargas bastante próximas, sendo para V-1 no valor de 5 kN e de 6kN para V-2A. Isso pode ser melhor visualizado no ponto de inflexão assinalado no gráfico a seguir (figura 205). Neste gráfico foi assinalada a região de inflexão das curvas para as duas vigas, representando a mudança de rigidez que ocorre na fissuração do concreto

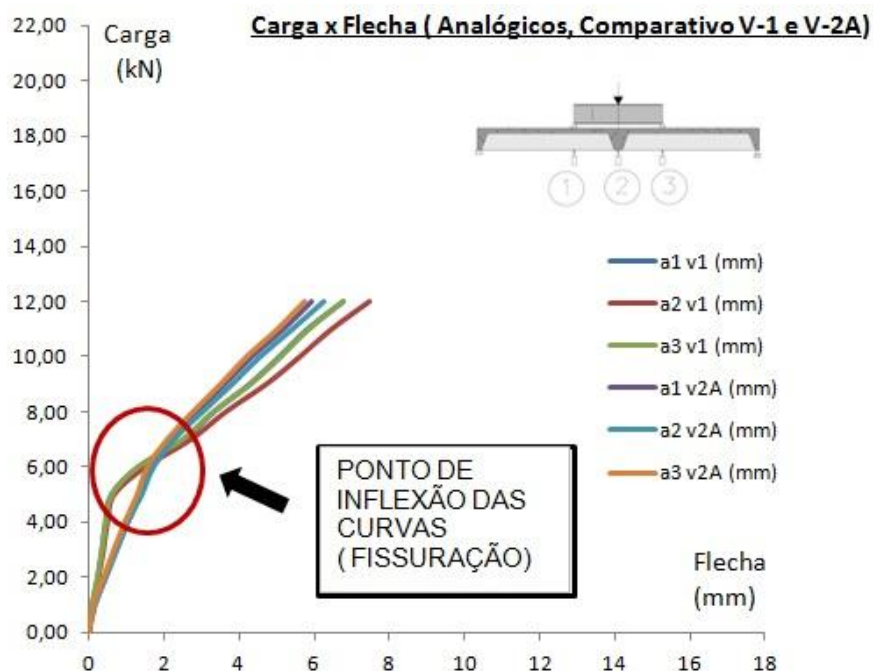


Figura 205 – Gráfico Carga x Flecha – comparativo V-1 e V-2A

5.2 Determinação das tensões experimentais

5.2.1 Tensões experimentais nos modelos de vigas V-2A e V-2B

Nos modelos de vigas V-2A e V-2B foram monitoradas deformações no concreto nas direções principal e secundária, no entanto, apenas as tensões na direção principal serão calculadas neste item. Essas tensões possibilitarão um comparativo entre os valores obtidos no laboratório e os resultados a partir de modelos numéricos.

Embora o comportamento das deformações na direção secundária (nervura secundária) tenha sido bastante peculiar, as tensões nessas nervuras não foram calculadas. Ou seja, apenas as tensões de tração e compressão do concreto e tensões de tração no aço das armaduras de flexão foram calculadas e tabeladas.

Visando facilitar a compreensão, será apresentada a figura esquemática a seguir indicando a referência dos pontos de verificação de tensões nos modelos de vigas (figura 206).

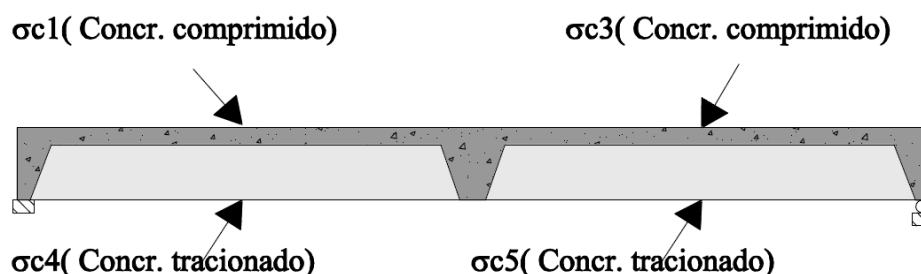


Figura 206 – Esquema das tensões verificadas no concreto

As tensões experimentais para o concreto na seção de V-2A e V-2B serão apresentados nas tabelas a seguir (tabelas 51 e 52). Convém frisar, que embora as tabelas apresentem as tensões para valores de carga 14,0 kN, a fissuração de ambas as peças ocorreu para cargas da ordem de 8,0 a 8,5kN, para as vigas instrumentadas.

Tabela 51 – Resumo das tensões de compressão no concreto de V-2A

Viga V-2A- Concreto-Tensões experimentais de compressão					
Carga	Deform. de Compressão		Tensão. de Compressão		σ Média
	$\varepsilon_{c1(0/00)}$	$\varepsilon_{c3(0/00)}$	$\sigma_{c1}(\text{MPa})$	$\sigma_{c3}(\text{MPa})$	$(\sigma_{c1} + \sigma_{c3}) / 2$
0	0	0	0	0	0
1	-0,0005	-0,0006	-0,0119	-0,0131	-0,0125
2	-0,0087	-0,0014	-0,2071	-0,0333	-0,1202
3	-0,0103	-0,0082	-0,2451	-0,1952	-0,2202
4	-0,0187	-0,0155	-0,4451	-0,3689	-0,407
5	-0,0276	-0,0233	-0,6569	-0,5545	-0,6057
6	-0,0369	-0,033	-0,8782	-0,7854	-0,8318
7	-0,0495	-0,0413	-1,1781	-0,9829	-1,0805
8	-0,0644	-0,0526	-1,5327	-1,2519	-1,3923
9	-0,0776	-0,0877	-1,8469	-2,0873	-1,9671
10	-0,0918	-0,1048	-2,1848	-2,4942	-2,3395
11	-0,1149	-0,1224	-2,7346	-2,9131	-2,8239
12	-0,1283	-0,1371	-3,0535	-3,263	-3,1583
13	-0,1397	-0,1476	-3,3249	-3,5129	-3,4189
14	-0,1518	-0,1569	-3,6128	-3,7342	-3,6735

Tabela 52 – Resumo das tensões de compressão no concreto de V-2B

Viga V-2B- Concreto-Tensões experimentais de compressão					
Carga	Deform. de Compressão		Tensão. de Compressão		σ Média
P_{tot} (kN)	$\varepsilon_{c1}(0/00)$	$\varepsilon_{c3}(0/00)$	σ_{c1} (MPa)	σ_{c3} (MPa)	$(\sigma_{c1} + \sigma_{c3}) / 2$
0	0	0	0	0	0
1	-0,0049	-0,0054	-0,117	-0,129	-0,123
2	-0,0103	-0,012	-0,245	-0,286	-0,265
3	-0,0157	-0,0198	-0,374	-0,471	-0,422
4	-0,0213	-0,0264	-0,507	-0,628	-0,568
5	-0,0267	-0,0334	-0,635	-0,795	-0,715
6	-0,0327	-0,0427	-0,778	-1,016	-0,897
7	-0,0418	-0,0576	-0,995	-1,371	-1,183
8	-0,0505	-0,0773	-1,202	-1,84	-1,521
9	-0,0599	-0,1016	-1,426	-2,418	-1,922
10	-0,0884	-0,125	-2,104	-2,975	-2,539
11	-0,1111	-0,1435	-2,644	-3,415	-3,03
12	-0,132	-0,1707	-3,142	-4,063	-3,602
13	-0,152	-0,1868	-3,618	-4,446	-4,032
14	-0,1819	-0,2041	-4,329	-4,858	-4,593

Excepcionalmente no caso de V-2A os resultados do extensômetro E_c -5 não foram coerentes com as deformações do concreto, por isso, não foram calculadas as tensões σ_c 5. As tensões de tração σ_c 4 serão resumidas na tabela a seguir (tabela 53).

Tabela 53 – Resumo das tensões de tração no concreto de V-2A

Viga V-2A- Tensões Experimentais de tração					
Carga	Deformação de Tração	Tensão de Tração	Carga	Deformação de Tração	Tensão de Tração
P_{tot} (kN)	$\varepsilon_{c4}(0/00)$	MPa	P_{tot} (kN)	$\varepsilon_{c4}(0/00)$	MPa
0,00	0,0000	0,0000	8,00	0,0381	0,8773
1,00	0,0049	0,1128	9,00	0,0422	0,9717
2,00	0,0002	0,0046	10,00	0,0432	0,9947
3,00	0,0061	0,1405	11,00	0,043	0,9901
4,00	0,0127	0,2924	12,00	0,0455	1,0477
5,00	0,0191	0,4398	13,00	0,0474	1,0914
6,00	0,0243	0,5595	14,00	0,0493	1,1352
7,00	0,0321	0,7391	--	--	--

De maneira geral, os extensômetros localizados na zona tracionada do concreto tem seu funcionamento alterado quando se inicia a fissuração. Por isso, na viga V-2B só foi possível calcular as tensões no concreto tracionado até uma carga de 9 kN, conforme tabela a seguir (tabela 54).

Tabela 54 – Resumo das tensões de tração no concreto de V-2B

Viga V-2B- Concreto-Tensões experimentais de tração					
Carga	Deform. de Tração		Tensão. de Tração		σ Média
Ptot (kN)	$\epsilon_{c4}(0/00)$	$\epsilon_{c5}(0/00)$	$\sigma_{c4}(MPa)$	$\sigma_{c5}(MPa)$	$(\sigma_{c4} + \sigma_{c5}) / 2$
0	0	0	0	0	0
1	0,0079	0,0076	0,182	0,175	0,178
2	0,0146	0,0161	0,336	0,371	0,353
3	0,0247	0,0261	0,569	0,601	0,585
4	0,0354	0,0395	0,815	0,91	0,862
5	0,0445	0,0544	1,025	1,253	1,139
6	0,053	0,0766	1,22	1,764	1,492
7	0,0555	0,1063	1,278	2,448	1,863
8	0,063	0,1681	1,451	3,871	2,661
9	0,0795	--	1,831	--	1,831

5.2.2 Tensões experimentais em PL-01 e PL-02

Os valores das tensões foram calculados com base nas deformações obtidas experimentalmente. Serão apresentados apenas os valores do concreto nas zonas comprimidas e tracionadas, que foram monitorados em quatro pontos localizados nas nervuras principais. O esquema dos pontos onde foram verificadas as tensões experimentais, conforme a figura a seguir (figura 207).

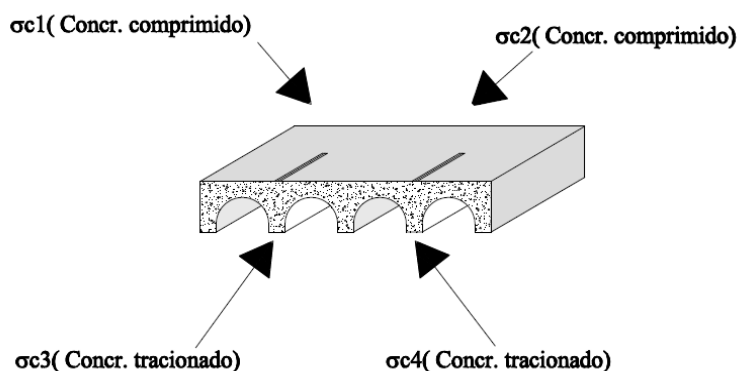


Figura 207 – Esquema das tensões verificadas no concreto para os painéis de laje

Serão apresentados a seguir apenas as tensões até um valor de carga de 14kN (tabela 55).

Tabela 55 –Tensões de compressão verificadas experimentalmente em PL-01

PL-01 Deformações e tensões experimentais de compressão					
Carga	Deform.Compressão		σ de compressão		σ Média (MPa)
P _{tot} (kN)	ε _{c1} (0/00)	ε _{c2} (0/00)	σ _{c1} (Mpa)	σ _{c2} (Mpa)	(σ _{c1} + σ _{c2})/2
0	0	0	0	0	0
1	-0,001	-0,0011	-0,023	-0,025	-0,024
2	-0,0043	-0,0053	-0,099	-0,122	-0,111
3	-0,006	-0,0073	-0,138	-0,168	-0,153
4	-0,0077	-0,0096	-0,177	-0,221	-0,199
5	-0,0095	-0,0114	-0,219	-0,262	-0,241
6	-0,0116	-0,0138	-0,267	-0,318	-0,292
7	-0,012	-0,0131	-0,276	-0,302	-0,289
8	-0,0138	-0,0154	-0,318	-0,355	-0,336
9	-0,0152	-0,0167	-0,35	-0,385	-0,367
10	-0,0167	-0,0183	-0,385	-0,421	-0,403
11	-0,019	-0,0206	-0,437	-0,474	-0,456
12	-0,0204	-0,0226	-0,47	-0,52	-0,495
13	-0,0237	-0,0284	-0,546	-0,654	-0,6
14	-0,0253	-0,0302	-0,583	-0,695	-0,639

Com o objetivo de levar-se em consideração possíveis imperfeições da superfície onde se encontravam instalados os extensômetros E_c-1 e E_c-2, foi feita uma média aritmética entre os valores de tensões calculados a partir das deformações medidas por estes dois dispositivos.

As tensões experimentais de tração foram resumidas na tabela a seguir (tabela 56).

Tabela 56 – Tensões de tração verificadas experimentalmente em PL-01

PL-01 Deformações e tensões experimentais de tração					
Cargas	Deform. De Tração		σ de Tração		σ Média (MPa)
	$\epsilon_{c3(0/00)}$	$\epsilon_{c4(0/00)}$	σ_{c3} (Mpa)	σ_{c4} (Mpa)	$(\sigma_{c3} + \sigma_{c4})/2$
0	0,0009	0,0013	0,021	0,03	0,025
1	0,0035	0,0059	0,081	0,136	0,108
2	0,0064	0,0074	0,147	0,17	0,159
3	0,0084	0,01	0,193	0,23	0,212
4	0,0107	0,0127	0,246	0,292	0,269
5	0,0134	0,016	0,309	0,368	0,338
6	0,016	0,02	0,368	0,461	0,414
7	0,0199	0,0246	0,458	0,566	0,512
8	0,0228	0,0285	0,525	0,656	0,591
9	0,0251	0,0318	0,578	0,732	0,655
10	0,0271	0,0346	0,624	0,797	0,71
11	0,0314	0,0399	0,723	0,919	0,821
12	0,0343	0,0436	0,79	1,004	0,897
13	0,0379	0,0471	0,873	1,085	0,979
14	0,0445	0,0545	1,025	1,255	1,14

De forma análoga ao procedimento anterior, os valores das tensões de PL-02 foram calculados com base nas deformações experimentais. Também, serão apresentados apenas os valores do concreto nas zonas comprimida e tracionada, que foram monitorados em pontos localizados nas nervuras principais. Apresentam-se a seguir as tensões de compressão até um valor de carga de 14 kN (tabela 57).

As tensões experimentais de tração para PL-02 foram calculadas, encontrando-se resumidas na tabela a seguir (tabela 58). As deformações foram monitoradas até uma carga de 10 kN, quando os extensômetros localizados na zona tracionada do concreto pararam de funcionar.

Tabela 57 –Tensões de compressão verificadas experimentalmente em PL-02

PL-02 Deformações e tensões experimentais					
Carga	Deform.Compressão		σ de compressão		σ Média (MPa)
Ptot (kN)	εc1(0/00)	εc2(0/00)	σ c1 (Mpa)	σ c2 (Mpa)	(σ c1 + σ c2)/2
0	0	0	0	0	0
1	-0,0007	-0,0116	-0,016	-0,267	-0,142
2	-0,0003	-0,0128	-0,007	-0,295	-0,151
3	0,0001	-0,0157	0,002	-0,362	-0,18
4	-0,0016	-0,0177	-0,037	-0,408	-0,222
5	-0,0034	-0,0199	-0,078	-0,458	-0,268
6	-0,0048	-0,0216	-0,111	-0,497	-0,304
7	-0,0061	-0,0234	-0,140	-0,539	-0,34
8	-0,0099	-0,026	-0,228	-0,599	-0,413
9	-0,0107	-0,0299	-0,246	-0,688	-0,467
10	-0,0135	-0,0296	-0,311	-0,682	-0,496
11	-0,0136	-0,0393	-0,313	-0,905	-0,609
12	-0,0141	-0,0411	-0,325	-0,946	-0,636
13	-0,0152	-0,0431	-0,350	-0,992	-0,671
14	-0,0173	-0,0455	-0,398	-1,048	-0,723

Tabela 58 –Tensões de tração verificadas experimentalmente em PL-02

PL-02 Deformações e tensões experimentais de tração					
Carga	Deform.Tração		σ de Tração		σ Média (MPa)
Ptot (kN)	εc3(0/00)	εc4(0/00)	σ c3 (Mpa)	σ c4 (Mpa)	(σ c3 + σ c4)/2
0	0	0	0	0	0
1	0,0065	0,0088	0,15	0,203	0,176
2	0,0094	0,0118	0,216	0,272	0,244
3	0,0132	0,0162	0,304	0,373	0,338
4	0,0164	0,0195	0,378	0,449	0,413
5	0,0194	0,0226	0,447	0,52	0,484
6	0,0219	0,0255	0,504	0,587	0,546
7	0,0257	0,0291	0,592	0,67	0,631
8	0,0322	0,0346	0,741	0,797	0,769
9	0,0355	0,0399	0,817	0,919	0,868
10	0,0339	0,0398	0,781	0,916	0,849

5.3 Elaboração dos modelos numéricos

5.3.1 Modelos numéricos para as vigas

Para possibilitar um comparativo entre os resultados teóricos e os dados obtidos experimentalmente, as peças ensaiadas foram reproduzidas com a utilização do software SAP 2000 (2011). Para as vigas foram desenvolvidos modelos que foram construídos a partir de elementos do tipo “Shell”, cujas dimensões basearam-se nas seções equivalentes já apresentadas em itens anteriores.

Cada elemento foi elaborado já pertencendo a um determinado grupo, estando as vigas constituídas por quatro grupos, especificados a seguir:

- Laje- grupo utilizado para nomear os elementos da mesa da viga;
- Nervura principal- utilizado para nomear a nervura principal (alma) da viga;
- Nervura secund 1- utilizado designar as nervuras secundárias nos extremos (apoios) da viga;
- Nervura secund 2- utilizado designar a nervura secundária no centro da viga.

Será apresentada a seguir uma figura extraída de uma das janelas do programa (menu “DEFINE”), onde se apresentam os grupos acima relacionados (figura 208).

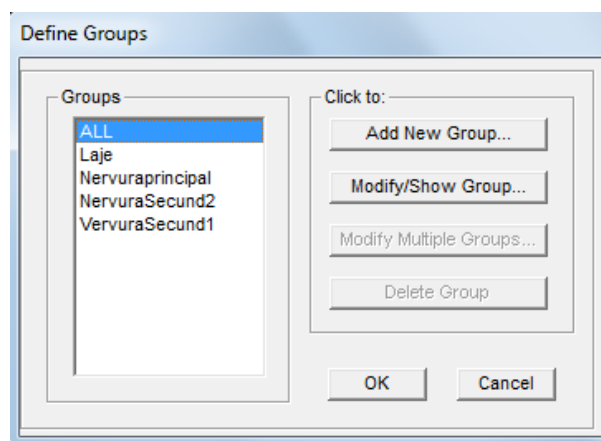


Figura 208 – Determinação dos grupos de elementos das vigas

Quanto à discretização do modelo, buscou-se a construção de uma malha com elementos o mais próximo possível da forma quadrada. As dimensões destes elementos são apresentadas na tabela a seguir, de acordo com o elemento que foi discretizado (tabela 59).

Tabela 59– Resumo da discretização usada nas vigas

Discretização das vigas			
Grupos	Dimensões do Grid (cm)	Plano	Quantidade de Áreas
Laje (mesa)	5,3 x 4,3	X-Y	240
Nervura Principal	5,3 x 5,0	X-Z	120
Nervura Secund.1	5,6 x 4,3	Y-Z	18
Nervura Secund.2	5,6 x 4,3	Y-Z	18

A aplicação do carregamento foi reproduzida aplicando carga concentrada nos nós que correspondem às coordenadas do ponto de aplicação das cargas no modelo experimental. Esta reprodução da aplicação do carregamento, e também as condições de apoio são apresentadas na figura a seguir (figura 209).

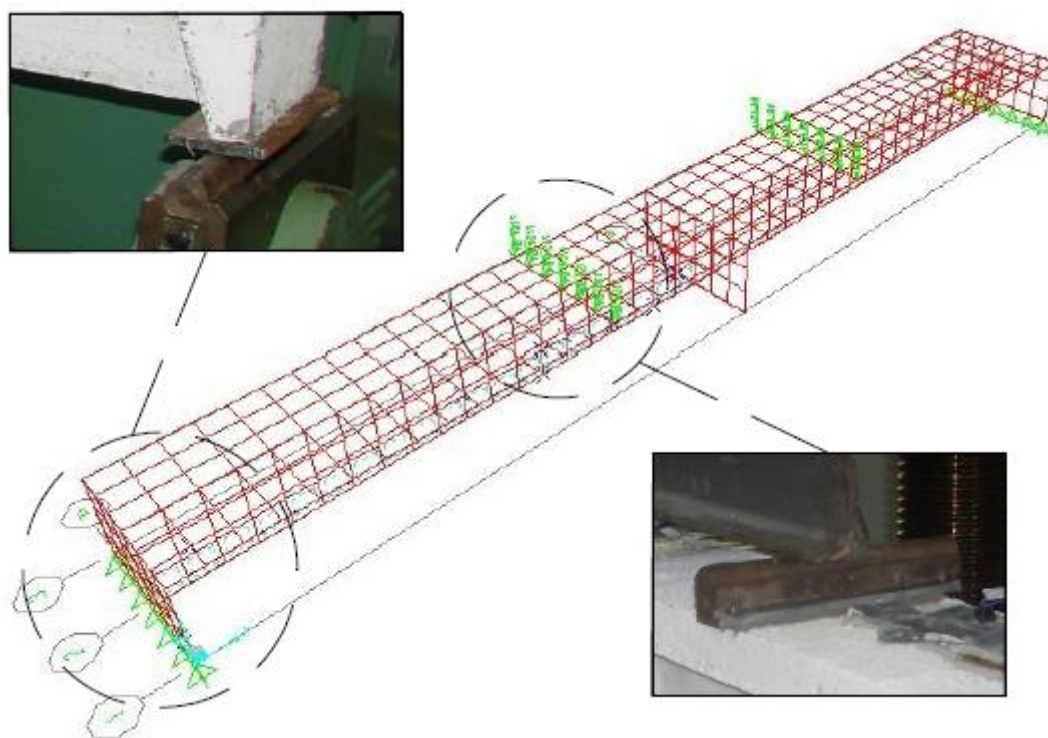


Figura 209 – Aspecto da aplicação de carga e dos apoios, modelados no SAP2000.

5.3.2 Modelos numéricos para as lajes PL-01 e PL-02

Para um comparativo entre os resultados teóricos e os dados obtidos experimentalmente com os modelos reduzidos de lajes, as peças ensaiadas foram reproduzidas com a utilização do programa SAP 2000 (2011).

Para os painéis de laje PL-01 e PL-02 foram desenvolvidos modelos, construídos a partir de elementos do tipo “Shell”, cujas dimensões basearam-se nas seções equivalentes das lajes, já apresentadas em itens anteriores.

Cada elemento foi elaborado já pertencendo a um determinado grupo, estando as lajes constituídas por três grupos, especificados a seguir:

- Mesa- grupo utilizado para nomear os elementos da mesa da laje;
- Nervura X- utilizado para nomear as nervuras principais da laje;
- Nervura Y- utilizado designar as nervuras secundárias na laje.

Será apresentada a seguir uma figura extraída de uma das janelas do programa (menu “DEFINE”), onde se apresentam os grupos acima relacionados (figura 210).

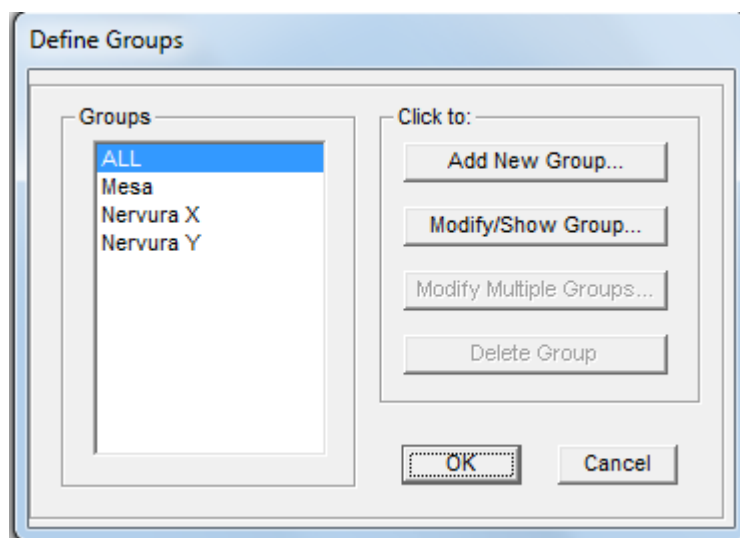


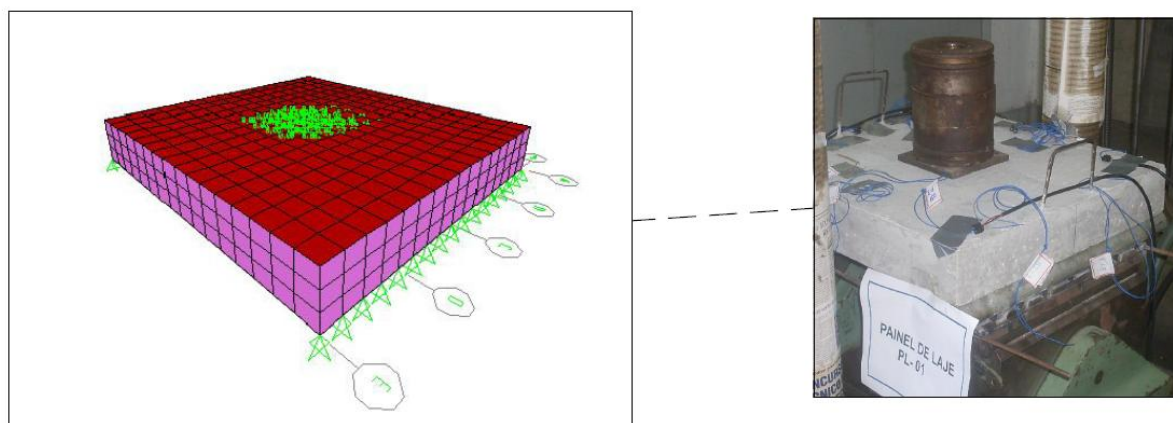
Figura 210 – Determinação dos grupos de elementos das lajes

A discretização dos elementos que foi utilizada no modelo será resumida na tabela a seguir (tabela 60).

Tabela 60 – Resumo da discretização das lajes

Discretização das lajes-modelos reduzidos				
Laje	Grupos	Dimensões do Grid (cm)	Plano	Quantidade de Áreas
PL-01	Laje	3,68 x 3,43	X-Y	256
	Nervura Principal (x)	3,68 x 2,83	X-Z	48
	Nervura Secundária (y)	3,43 x 2,83	Y-Z	48
PL-02	Laje	3,68 x 3,62	X-Y	384
	Nervura Principal (x)	3,62 x 2,83	x-Z	72
	Nervura Secundária (y)	3,43 x 2,83	Y-Z	48

Na laje PL-01, a aplicação do carregamento foi reproduzida aplicando carga concentrada nos nós que correspondem às coordenadas da região de aplicação das cargas no modelo experimental. Esta reprodução da aplicação do carregamento, e também as condições de apoio são apresentadas na figura a seguir (figura 211).

**Figura 211 – Aspecto da aplicação de cargas e apoios do modelo de PL-01**

Para PL-02 foi utilizada a mesma metodologia, ou seja, os apoios foram reproduzidos pela restrição nos nós localizados nos extremos, ao longo do menor vão. Para lançar o carregamento, foram aplicadas cargas nos nós na região localizada no centro da laje, semelhante ao procedimento adotado nos ensaios de laboratório.

5.4 Comparativos entre os resultados numéricos e os experimentais das tensões para PL-01 e PL-02

5.4.1 Comparativos das tensões de PL-01

O modelo numérico para um comparativo foi elaborado utilizando a seção equivalente, já apresentada anteriormente. Os valores de tensões foram analisados para cargas de 02 em 02 kN, até um valor de carga de 10 kN, onde o concreto ainda apresentava comportamento linear. O aspecto da distribuição de tensões ao longo de PL-01 será apresentado na figura a seguir (figura 212).

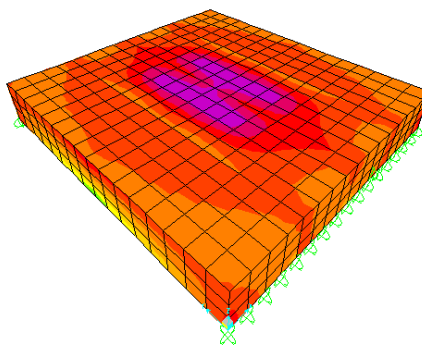


Figura 212 – Aspecto da distribuição de tensões em PL-01

O estado de tensões da figura acima foi obtido para uma combinação de carregamento que incluía o peso próprio mais a carga aplicada pela prensa, sendo esta distribuída no centro da laje. Um comparativo entre estes valores numéricos e a tensão média experimental será apresentado na tabela a seguir (tabela 61).

Tabela 61 – Comparativo das tensões experimentais e numéricas para PL-01

Ptot (kN)	σ Média Experim. (Mpa)	σ Num. SAP 2000 (Mpa)
2,00	-0,1105	-0,1217
4,00	-0,1992	-0,155
6,00	-0,2924	-0,328
8,00	-0,3362	-0,332
10,00	-0,4030	-0,479

5.4.2 Comparativos das tensões de PL-02

Para comparação entre as tensões obtidas de forma experimental e o modelo numérico, foram analisados valores de tensões para cargas a cada 2 kN, até um valor de 10 kN. O aspecto da distribuição de tensões ao longo de PL-02 será apresentado na figura a seguir (figura 213).

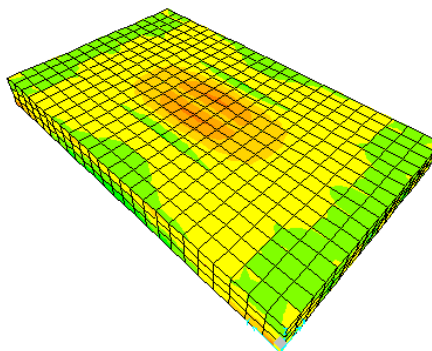


Figura 213 – Aspecto da distribuição de tensões em PL-02

O estado de tensões apresentado na figura acima foi obtido para uma combinação de carregamento que incluía o peso próprio mais a carga aplicada pela prensa, distribuída como carregamento por área (“Area Loads”) no centro da laje. Um comparativo entre estes valores numéricos e a tensão média experimental será apresentado na tabela a seguir (tabela 62).

Tabela 62– Comparativo das tensões experimentais e numéricas para PL-02

Ptot (kN)	σ Média Experim. (Mpa))	σ Num. SAP 2000 (Mpa)
2,00	-0,151	-0,1141
4,00	-0,222	-0,215
6,00	-0,304	-0,3668
8,00	-0,413	-0,5631
10,00	-0,496	-0,643

5.5 Cálculo da largura colaborante

5.5.1 Cálculo da largura colaborante em V-2A e V-2B, a partir das tensões na mesa

Embora neste trabalho tenham sido ensaiados outros modelos de vigas, apenas V-2A e V-2B tiveram suas deformações monitoradas. Nestas vigas, as tensões experimentais foram obtidas através dos cálculos empregando estas deformações lidas no decorrer dos ensaios.

As curvas de tensões foram traçadas com os valores lidos no modelo numérico que foi elaborado com o a utilização do software SAP 2000 (2011). A partir da curva das tensões, foram determinadas as áreas sob estas curvas de acordo com as expressões já apresentadas em capítulo anterior deste texto.

Para facilitar o traçado das curvas de tensão, foram usadas como referencia a tensão em quatro pontos de uma seção ao longo da mesa, sendo estes pontos denominados por: $\sigma_{\text{mínima}}$, que é a tensão nos bordos da mesa ; σ_{interm} , que representa as tensões em dois pontos intermediários; $\sigma_{\text{máxima}}$, sendo a tensão máxima de compressão no centro da mesa.

O ponto adotado para verificação da curva de tensões (figura 214) foi o mesmo onde, nos modelos experimentais, foram instalados os extensômetros na mesa das vigas, ou seja, as tensões foram verificadas a 53 cm da extremidade da viga.

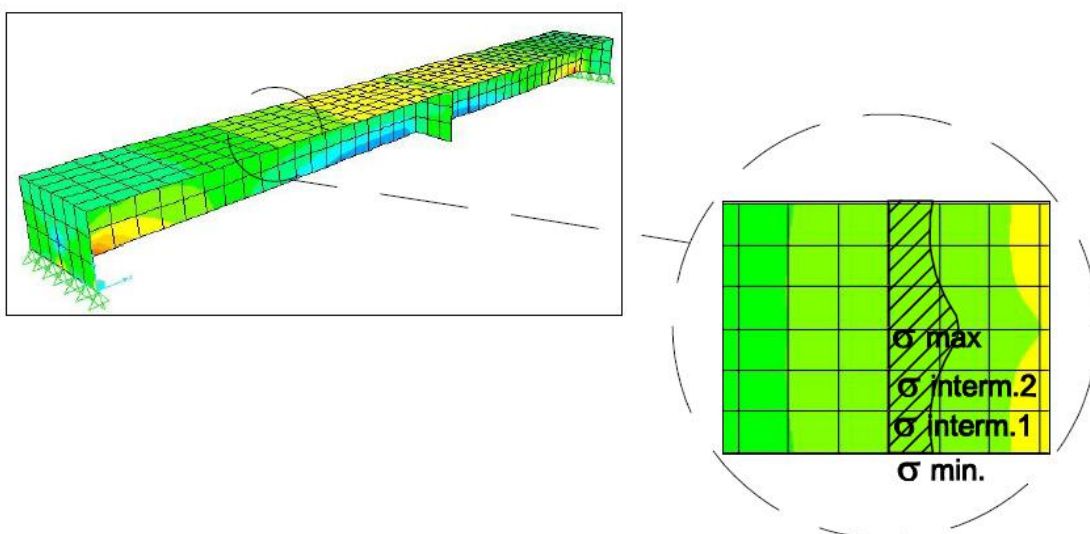


Figura 214 – Aspecto da curva de tensões

Os valores de deformações que foram empregados para comparativo entre os valores numéricos e os experimentais encontram-se ainda na fase linear dos ensaios, ou seja, foram utilizados valores de tensão calculados somente para a peça com o concreto não fissurado.

O aspecto da distribuição de tensões para carregamento próximo a carga de fissuração das vigas V-2A e V-2B (8,0kN) é apresentado na figura a seguir (figura, estando as tensões expressas em kN/m². Os valores da legenda na figura a seguir devem ser multiplicados por 1×10^3 (figura 215).

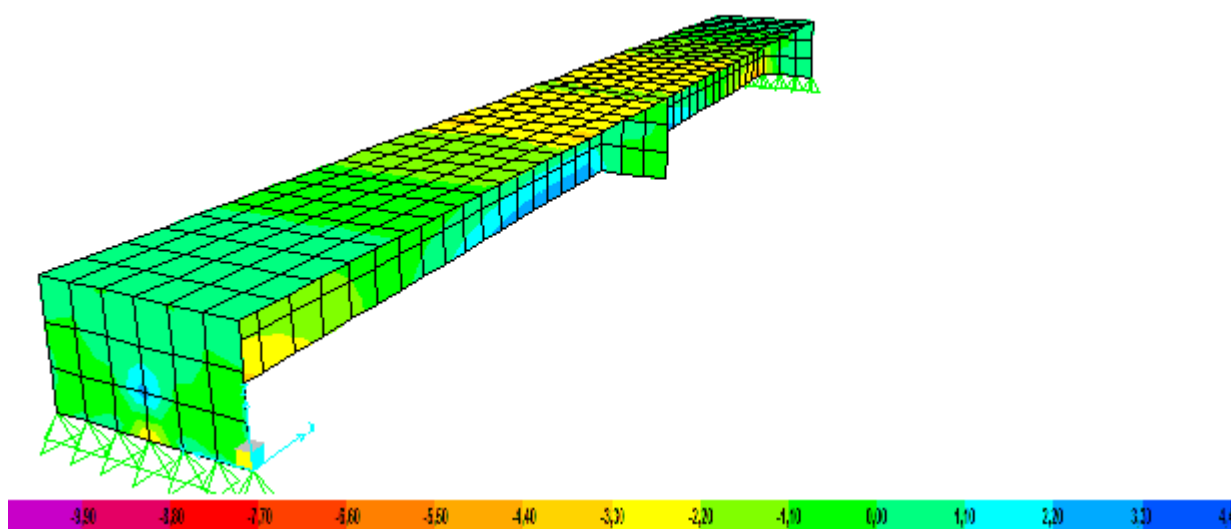


Figura 215 – Aspecto da distribuição de tensões na carga de fissuração

Quando ocorreu a fissuração, os resultados numéricos obtidos com a modelagem aplicada no programa SAP 2000 (2011) se distanciaram dos valores obtidos experimentalmente. Isso se explica pelo comportamento não linear do concreto após a fissuração que não é facilmente reproduzido por um programa computacional, salvo, quando este tenha sido elaborado especificamente para este fim.

Com o objetivo de verificar a largura de mesa (b_f) que efetivamente contribui na resistência da zona comprimida dos modelos de viga, foram feitos cálculos baseados nas tensões dos modelos numéricos e comparando estas tensões de

compressão aos valores de tensão experimental. Estes dados são apresentados na tabela a seguir (tabela 63).

Tabela 63 –Tensões de compressão e largura colaborante de V-2A e V-2B

Cálculo da largura colaborante de V-2A e V-2B						
Cargas (kN)	σ Modelo Numérico (Mpa)	Posição	Área sob a curva	Largura Colaborante b_f (m)	σ Máxima (média) Experimental V-2A (Mpa)	σ Máxima (média) Experimental V-2B (Mpa)
2kN	0,495	(maxima)	0,1170	0,2365	-0,120	-0,265
	0,452	(interm. 2)				
	0,444	(interm. 1)				
	0,435	(mínima)				
4kN	0,879	(maxima)	0,2092	0,2380	-0,407	-0,568
	0,818	(interm. 2)				
	0,792	(interm. 1)				
	0,766	(mínima)				
6kN	1,340	(maxima)	0,3195	0,2384	-0,832	-0,897
	1,260	(interm. 2)				
	1,200	(interm. 1)				
	1,170	(mínima)				
8kN	1,710	(maxima)	0,4111	0,2404	-1,392	-1,521
	1,620	(interm. 2)				
	1,570	(interm. 1)				
	1,470	(mínima)				
10kN	2,380	(maxima)	0,5655	0,2376	-2,330	-2,539
	2,210	(interm. 2)				
	2,140	(interm. 1)				
	2,070	(mínima)				

Para as cargas iniciais dos ensaios de V-2A e V-2B, ocorrem valores de tensões teóricas, em alguns casos, próximos ao dobro das tensões experimentais. À medida que os ensaios avançam, obtém-se resultados mais próximos entre teóricos

e experimentais. Isso pode, em parte, ser explicado por acomodações iniciais que ocorrem nos apoios e nos elementos que transmitem as cargas às vigas.

5.5.2 Cálculo da largura colaborante em PL-01, a partir das flechas experimentais

Os cálculos da largura colaborante para PL-01, obtidos através da flecha experimental, foram baseados nas equações (7), (11), (12) e (13), apresentadas anteriormente. Para verificação das flechas foram utilizados defletômetros e transdutores, sendo os últimos conectados ao equipamento que transforma os sinais elétricos em informações de deslocamento.

A tabela a seguir apresenta os cálculos da largura colaborante elaborados para PL-01, estando sobrescrito ao lado de cada item o número da equação utilizada no cálculo (tabela 64).

Tabela 64 – Cálculo da largura colaborante para PL-01

Cálculo da largura colaborante para PL-01						
P(KN)	q= P/(c x d) (kN/m²)	Flecha (cm)	Coefic. $\alpha^{(13)}$	Coefic. $\beta^{(12)}$	h_e (m)⁽¹¹⁾	b_f (m)⁽⁷⁾
0	0,000	0	0	0	0,0000	0
1	47,562	0,4756	0,02	0,00000008	0,0715	0,098
2	95,125	0,9512	0,04	0,00000016	0,0781	0,076
2,5	118,906	1,1891	0,05	0,0000002	0,0815	0,066
3	142,687	1,4269	0,06	0,00000025	0,0824	0,064
3,5	166,468	1,6647	0,07	0,00000029	0,0839	0,061
4	190,250	1,9025	0,08	0,00000033	0,0850	0,059
4,5	214,031	2,1403	0,09	0,00000037	0,0852	0,058
5	237,812	2,3781	0,09	0,00000041	0,0854	0,058
5,5	261,593	2,6159	0,1	0,00000045	0,0855	0,058
6	285,375	2,8537	0,11	0,00000049	0,0857	0,057
6,5	309,156	3,0916	0,12	0,00000053	0,0860	0,057
7	332,937	3,3294	0,13	0,00000057	0,0860	0,057
7,5	356,718	3,5672	0,14	0,00000061	0,0861	0,056
8	380,499	3,805	0,15	0,00000066	0,0859	0,057
8,5	404,281	4,0428	0,16	0,0000007	0,0860	0,057
9	428,062	4,2806	0,17	0,00000074	0,0858	0,057
9,5	451,843	4,5184	0,18	0,00000078	0,0855	0,058
10	475,624	4,7562	0,19	0,00000082	0,0850	0,059

Verifica-se (tabela 64) que os valores de h_{exp} encontrados experimentalmente são bastante próximos da altura real da seção é de 8,5 cm. Isso provavelmente deve-se ao fato de PL-01 apresentar pequenas medidas de deslocamentos (flechas). Estes valores reduzidos de flechas são, também, consequência dos vãos de dimensões reduzidas do painel de laje.

5.5.3 Cálculo da largura colaborante em PL-02, a partir das flechas experimentais

A largura colaborante para PL-02 foi baseada nas mesmas equações do item anterior. Para verificação das flechas foram utilizados defletômetros e transdutores, cujas características e posicionamentos já foram detalhados em outras partes deste trabalho. A tabela a seguir apresenta os cálculos da largura colaborante elaborados para PL-02 (tabela 65).

Tabela 65 – Cálculo da largura colaborante para PL-02

CÁLCULO DA LARGURA COLABORANTE PARA PL-02						
P(KN)	q= P/(c x d) (kN/m²)	Flecha (cm)	Coefic. $\alpha^{(13)}$	Coefic. $\beta^{(12)}$	h_e (m)⁽¹¹⁾	b_f (m)⁽⁷⁾
0	0	0	0	0,00000000	0	0
1	32,841	0,3284	0,13	0,00000007	0,08626	0,056
2	65,681	0,6568	0,26	0,00000013	0,08622	0,056
2,5	82,102	0,821	0,32	0,00000016	0,08514	0,058
3	98,522	0,9852	0,39	0,00000019	0,08428	0,06
3,5	114,943	1,1494	0,45	0,00000023	0,08404	0,061
4	131,363	1,3136	0,52	0,00000026	0,08337	0,062
4,5	147,783	1,4778	0,58	0,00000029	0,08364	0,062
5	164,204	1,642	0,65	0,00000032	0,08417	0,06
5,5	180,624	1,8062	0,71	0,00000036	0,08493	0,059
6	197,044	1,9704	0,78	0,00000039	0,08584	0,057
6,5	213,465	2,1346	0,84	0,00000042	0,08624	0,056
7	229,885	2,2989	0,91	0,00000045	0,08637	0,056
7,5	246,305	2,4631	0,97	0,00000049	0,08593	0,057
8	262,726	2,6273	1,04	0,00000052	0,07442	0,087
8,5	279,146	2,7915	1,1	0,00000055	0,07298	0,093
9	295,567	2,9557	1,17	0,00000058	0,06602	0,125
9,5	311,987	3,1199	1,23	0,00000062	0,06544	0,128
10	328,407	3,2841	1,3	0,00000065	0,06447	0,134

Os valores iniciais de h_{exp} encontrados para PL-02 experimentalmente (tabela 65) são próximos da altura real da seção é de 8,5 cm. Mas, à medida que o ensaio evolui os valores encontrados de h_{exp} vão decrescendo, enquanto a largura colaborante aumenta até alcançar o valor da largura b_f real da seção(13cm).

A partir do valor de carga 8,5 kN, houve um começo de fissuração que acarretou mudança na rigidez da laje. Com isso, a largura colaborante b_{fexp} alcançou valores superiores a largura real da mesa, chegando a ser encontrado um b_{fexp} de 19cm.

Ao alterar-se a rigidez do elemento, modifica-se o seu comportamento sob o aspecto dos deslocamentos e das tensões. Essa mudança de comportamento pode ser observada pela inflexão nos seguintes gráficos: Carga x Flecha e Carga x Deformação. Com isso, as expressões utilizadas anteriormente para determinar b_{fexp} tornam-se pouco compatíveis com as dimensões reais da mesa.

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões sobre os modelos de vigas (faixas)

Tendo em vista o comportamento diferenciado que os modelos de faixas de nervuras (modelos de vigas) tem em relação aos modelos de laje, optou-se por comentá-los separadamente.

Com relação a presença ou não de tubulação inserida nas vigas, não foram constatadas fissuras ao longo da mesa na região próxima a esta tubulação, embora a mesa possua apenas 4cm de altura. A tubulação não acarretou fissuras entre a mesa e a alma da viga, mesmo situando-se no limite entre as duas.

Para a viga V-1 (que não possuía tubulação na mesa), a carga de ruptura foi de 17kN. A viga V-3 que foi submetida a carregamento cíclico, e também não possuía tubulação, teve uma carga de ruptura de 16kN.

Levando-se em conta a mudança de rigidez, ocasionada pelo início da fissuração, as vigas tiveram um desempenho bastante parecido. A 1ª indicação de mudança de rigidez que pode ser notada nos gráficos para valores entre 5 e 6kN. A 2ª mudança de rigidez é observada para valores entre 14 e 16kN (figuras 138, 141, 155 e 169).

Para a mesma carga de 13kN, as vigas V-2A e V-2B que possuíam armaduras diferentes, apresentaram valores de deformação na zona comprimida da mesa em torno de $-0,15 \text{‰}$ de deformação (figuras 144 e 158).

Para as armaduras dos modelos V-2A e V-2B, para cargas entre 5 e 6kN, houve uma alteração nos gráficos indicando um início de sollicitação das mesmas na resistência à tração da seção das vigas.

O comportamento das nervuras secundárias foi o mais diferenciado. Por estarem orientados por outra normal, os extensômetros do concreto e do aço localizados nesta nervura registraram deformações contrárias na zona da mesa comprimida, ou seja, os extensômetros situados no concreto apresentaram alongamento (figuras 146 e 160). Isto indica que a maior inércia da nervura secundária acarreta uma redistribuição das tensões nesta região, o que pode ser observado também nos modelos numéricos.

As vigas V-2A e V-2B apresentaram carga de ruptura bastante diferenciada, sendo a carga de ruptura da 1ª viga de 27,85kN, enquanto a carga da 2ª viga foi de 17,75kN. Cabe lembrar que ambas as vigas possuíam tubulação embutida, mas armaduras diferentes.

A viga V-2B foi a única em que ocorreu a ruptura do aço (ϕ de 8.0mm), na região próxima a extensômetro E_s-3 (figura 166). Isto provavelmente ocorreu por conta da diminuição de seção da armadura, ocasionada pelo processo de retirada de parte das nervuras para instrumentação. Por mais cuidadosa que seja a operação de preparo da superfície do aço, em alguns casos, acaba-se por diminuir um pouco a seção da armadura.

A largura colaborante calculada para estes modelos de viga, através da curva de tensões dos modelos numéricos, alcançou valores próximos a largura total da mesa (26cm) para cargas próximas a carga de fissuração. Isto pode ser observado nos modelos numéricos, onde, a medida que se aumenta a carga ocorre uma distribuição das tensões por toda a largura da mesa.

6.2 Conclusões sobre os modelos de lajes PL-01 e PL-02

6.2.1 Painel de laje PL-01

O painel de laje PL-01 apresentou uma mudança na rigidez para cargas em torno de 10kN. Esta mudança é visível em todos os gráficos carga x flecha (gráfico de defletômetro e gráfico de transdutor).

As deformações registradas no concreto para PL-01 foram simétricas (extensômetros E_c-1 e E_c-2) até uma carga de 17kN (figura 178). A partir deste, valor o extensômetro E_c-1 registrou valores de deformação superiores a E_c-2 . Isto se deve, em parte, a pequenas imperfeições e assimetrias no posicionamento final das armaduras dentro do concreto.

Na direção secundária de PL-01, as deformações foram assim como nas vigas, de tração na zona superior da mesa. Isto ocorreu, pois, também nas lajes a distribuição das tensões na parte superior da nervura se dá de forma diferenciada. O aumento da rigidez na região da nervura secundária acarreta uma mudança na concentração de tensões que pode ser notada também nos modelos numéricos.

As fissuras de PL-01 se iniciaram para uma carga de 12,5kN. Embora as fissuras seguintes só tenham tornado-se visíveis para uma carga de 20,30kN. As fissuras características de uma laje (ângulo de 60° com os apoios) apareceram para uma carga de 33,5kN (figura 185). Estas fissuras formaram-se justamente na região de maior concentração de tensões, indicada pelos modelos numéricos.

A ruptura do painel de laje PL-01 deu-se com o esmagamento do concreto na zona comprimida. Não houve ruptura do aço, mesmo considerando o pequeno diâmetro destas barras que sofreram alguma redução de seção ocasionada pelo preparo de sua superfície para instrumentação.

Embora o carregamento fosse aplicado em chapa na região central da laje, não foram observados efeitos da punção no concreto desta região. Mesmo ao término do ensaio, a região sob a chapa se encontrava ainda íntegra.

O modelo numérico de PL-01, embora tenha sido elaborado com a seção equivalente, mostrou uma concentração de tensões no mesmo local do bordo da laje onde puderam ser vistos deslocamentos do concreto da zona tracionada.

Os valores das tensões experimentais e numéricas de PL-01, divergem a medida que se aumenta o carregamento. Isso pode ser explicado por não haver modelado-se no SAP 2000 o comportamento não linear do concreto após a fissuração.

A largura colaborante de PL-01 apresentou resultados que ficaram em torno de 6cm que não chegaram à metade do valor da largura total da mesa do modelo reduzido (13cm). Isto pode ser atribuído, como exposto anteriormente, pelos pequenos valores de deslocamento (flechas) registrados neste painel.

6.2.2 Painel de laje PL-02

Para o painel de laje PL-02, ocorreram duas mudanças maiores de rigidez ao longo do ensaio. A 1ª mudança de rigidez pode ser observada para um valor de carga de 8,5kN (carga de fissuração). A 2ª mudança de rigidez pode ser observada para uma carga de 17kN (figura 192).

As deformações registradas pelos extensômetros E_c-1 e E_c-2 , mostraram-se bastante assimétricas (figura 195). Isto pode ser atribuído a problemas no funcionamento de um dos extensômetros, ou a alguma pequena diferença no posicionamento destes extensômetros.

As deformações no aço de PL-02 tiveram certa simetria até uma carga de 16kN, quando as deformações registradas por E_s-8 assumiram valores maiores (figura 199). Esta simetria de deformações pode ser observada para os extensômetros situados, também, em lados opostos do painel (E_s-6 e E_s-8).

O extensômetro situado na região da nervura secundária (E_c-5) apresentou comportamento anômalo, indicando que seu funcionamento não foi efetivo (figura 197). Isto pode ter ocorrido por conta de defeito no próprio extensômetro ou problemas na interface entre o extensômetro e o concreto, gerados por falhas na colagem.

O aparecimento das fissuras deu-se para uma carga de 8,5kN, e as fissuras características de um painel de laje (ângulo de 60° com os apoios) tornaram-se visíveis para uma carga de 12,5kN (figura 202). Não foram observadas fissuras geradas pelo efeito de punção da chapa de aplicação de cargas sobre a superfície do concreto.

A ruptura de PL-02 deu-se para uma carga de 32,2kN. Ocorreu esmagamento do concreto na zona comprimida e ruptura das armaduras. Ambos os fenômenos deram-se, como era de se esperar, nas regiões onde o modelo numérico indicou maior concentração de tensões.

No modelo numérico de PL-02, a medida que se aumentavam as cargas, os valores encontrados para a tensão se afastavam das tensões experimentais, de forma análoga ao painel de laje anterior.

As larguras colaborantes experimentais de PL-02 aumentam à medida que os valores das alturas equivalentes h_{exp} diminuem. Quando ocorreu a fissuração as expressões que vinham sendo utilizadas indicaram valores de largura colaborante superior a largura da mesa (13cm), ou seja, as expressões só tiveram validade para o concreto não fissurado.

Como neste trabalho foram ensaiados apenas dois painéis, não foi possível verificar de forma mais ampla o comportamento largura colaborante no concreto após a fissuração. Para uma maior confirmação da validade das expressões seriam necessários mais ensaios com painéis de laje.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

Propõe-se a realização de outros ensaios com lajes compostas por cubas semicilíndricas, utilizando painéis de laje com dimensões maiores que as apresentadas neste texto, com o objetivo de verificar-se, de maneira mais ampla, a validade das expressões aqui utilizadas. Poderiam ser confeccionados modelos variando-se, por exemplo, a relação entre vãos e o tipo de carregamento das lajes.

Sugere-se a elaboração de estudo experimental, para avaliar-se as deformações nas nervuras secundárias que apresentaram um comportamento bastante singular nos ensaios desenvolvidos para este estudo.

Propõe-se a elaboração de um estudo numérico e experimental contemplando o comportamento de lajes de cubas semicilíndricas ao cisalhamento. Neste estudo haveria a confecção de painéis com regiões maciças que seriam armadas e instrumentadas, objetivando a verificação das tensões cisalhantes nessas regiões, comparando-as aos resultados numéricos

Indica-se a possibilidade da realização de estudo numérico e experimental, para verificação da viabilidade da utilização de protensão nas lajes compostas por cubas semicilíndricas. Neste estudo poderiam ser testadas cordoalhas de protensão já empregadas em outros tipos de laje.

REFERÊNCIAS

ABAQUS (HKS 2000)- **User' Manual**, 2000.

ABDUL-WAHAB,H. M. S.; KHALIL, M. H. **Rigidity and strength of orthotropic reinforced concrete waffle slabs**. Journal of Structural Engineering, ASCE, vol 126, n. 2, p.219-227, 2000.

ACI 318-08, 2008, **Building Code Requirements for Reinforced Concrete**. 2008.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. de, **Extensometria Básica**. NEPAE/UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2004.

ARAÚJO, J. M., **Avaliação dos Procedimentos de Projeto das Lajes Nervuradas de Concreto Armado**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, nº 3, Lisboa, Portugal, p. 31-42, 2003.

ARAÚJO, J. M., **Curso de Concreto Armado**. Vol. 4. Ed. Dunas, Rio Grande do Sul, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222 - Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5739 – Ensaio de Compressão de corpos de prova Cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6118 – Norma Brasileira para projeto de Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2007.

BARBIRATO, B. C.,**Contribuições à Análise de Pavimentos de Edifícios em Laje Nervurada**. 1997. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BRITO,C. H. de ; FRAGNITO, H. L. **Guia Para Física Experimental Caderno de Laboratório, Gráficos e Erros**. São Paulo. Ed. UNICAMP,1997.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R., **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. São Carlos. EdUFSCar, 2009. 368p.

CHEN, S. S.; AREF, A. J.; CHIEWANICHAKORN, M. - **Proposed Effective Width Criteria for Composite Bridge Girders** . Journal of Bridge Engineering, p. 325-338, USA, 2007.

CHEN, S. S.; AREF, A. J.; CHIEWANICHAKORN, M., **Effectice flange width of composite girders in negative moment region**. Journal of the Transportation Research Board, p. 203-216, 2008.

DE PAULA, C. W., **Comportamento Estrutural de Lajes Nervuradas de Concreto Armado com Base no Emprego do ANSYS**. 2007. Dissertação de Mestrado – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

EBERICK V7, **User's Manual, 2011**.

EUROCODE (2004). **Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings**. Brussels, CEN, 253p.

FRANCA, A. B. M.; FUSCO, P. B., **As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios**. São Paulo. Ed. AFALA & ABRAPEX, 1997.

JEOM K. P., **Some recent advances in the concepts of plate-effectiveness evaluation**. Science Direct, 2008.

LEONHARDT, F., **Construções De Concreto**. Vol. 3 Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 1978.

LIMA, L. R. O., **Análise Experimental das Tensões- Notas de aula**. Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, sd.

LOO, Y.; SUTANDI, T. D., **Effective flange width formulas T-beams**. Concrete International, Detroit, Michigan, p. 40 – 45, 1986.

Modelagem de Lajes de Concreto Armado por Analogia de Grelhas – Conceitos Iniciais, Disponível em: <http://www.altoqi.com.br> (acesso fevereiro 2012).

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. Ed. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, 2007.

RIBEIRO, F. L. B., **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

RÜSCH, H., **Concreto Armado e Protendido: Propriedades dos Materiais e Dimensionamento**. Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1981.

SALAMANA, T.; NASSIF, H. H., **Effective flange width for composite steel beams**. The Journal of Engineering Research, Vol. 8, USA, 2010.

SAP 2000, **User' Manual, 2011**.

SCHWETZ-, P. F., **Análise Numérico – Experimental de Lajes Nervuradas Sujeitas a Cargas Estáticas de Serviço**. 2011. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SCHWETZ, P. F., **Análise Teórico – Experimental de uma Laje Nervurada em Modelo Reduzido Sujeita a um Carregamento Linear**. 2005. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, N. M. T. F., **Análise Estática e Dinâmica de Lajes Nervuradas de Concreto Armado**. 2008. Dissertação De Mestrado – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Sistema construtivo de lajes REDUZCON, Disponível em:
<http://www.reduzcon.com.br> (acesso em outubro 2011).

SORIANO, H. L., **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Carlos. Ed. Edusp, 2003. 510p.

SOUZA, S. do S. M. de, **Análise Experimental de Lajes Lisas Nervuradas de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento**. 2007. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém.

SOUZA, S. T. de M., **Estudo Teórico – Experimental de dentes de Vigas Gerber de Pontes de Concreto Armado**. 1997. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SOUZA, V. C. M.; CUNHA, A. J. P., **Lajes em Concreto Armado e Protendido**. 2ª edição, Rio de Janeiro. EdUFF – EdUERJ, 1998.

STRAMANDINOL, J. S. B., **Contribuições à Análise de Lajes Nervuradas por Analogia de Grelhas**. 2003. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

STRAMANDINOLI, J. S. B.; LORIGGIO, D. D., **Lajes Nervurada: Cálculo dos Esforços e Deslocamentos Usando o Processo de Analogia de Grelha**. V Simpósio EPUSP, São Paulo, Brasil, 2003.