

Numerical and Experimental Study of a Real Scale Waffle Slab

Análise Teórico-Experimental de uma Laje Nervurada em Escala Natural



P. F. SCHWETZ ^a
paulete.schwetz@ufrgs.br

F. P. S. L. GASTAL ^b
gastal@ufrgs.br

L. C. P. SILVA F^o ^c
lcarlos66@gmail.com

Abstract

Nowadays, waffle slabs are a demand for structural designers, as a consequence of architectural design evolution and new building management concepts, in spite of its laborious numerical modeling. Therefore, it becomes necessary to know more about the structural behavior and improve the theoretical models used for simulating these slabs. The objective of this work was to analyze the adequacy of a design method widely used in the modeling of waffle slabs, verifying if it represents the slab behavior satisfactorily. A real scale waffle slab submitted to a load in a localized area was instrumented with strain gages and deflection gages for measuring specific strain and deflection in different points. The numerical analysis was made using a grid model developed by a local software company specialized in structural analysis. Tests showed a linear behavior, even though residual results could indicate cracking in some isolated sections. Numerically computed deflections presented a good estimate to test results and the experimental strains defined the presence of bending moments coincident with the forecasts of the theoretical model.

Keywords: waffle slab, reinforced concrete, grid analysis, instrumentation.

Resumo

Soluções estruturais sofisticadas e racionais são exigências crescentes no cotidiano de projetistas de estruturas, como consequência da evolução dos projetos arquitetônicos e dos novos conceitos de gerenciamento das construções. As lajes nervuradas se enquadram nesta realidade como uma atraente alternativa, por propiciar economia de materiais e mão-de-obra, com redução de perdas e aumento da produtividade, exigindo, porém, uma laboriosa modelagem numérica. Para entender melhor como funciona, na prática, este sistema construtivo, torna-se necessário obter um maior conhecimento sobre seu comportamento estrutural, bem como aperfeiçoar os modelos teóricos empregados para seu projeto e simulação. O objetivo deste trabalho é analisar a adequação de métodos de cálculo empregados na modelagem destas estruturas, verificando se os mesmos representam satisfatoriamente seu comportamento. Para tanto, foi instrumentada uma laje nervurada de concreto armado em escala natural. O estudo mediu deformações no concreto e deslocamentos verticais em seções características da estrutura submetida a um carregamento localizado em uma área pré-estabelecida. A análise numérica foi feita empregando-se o modelo de análise matricial de grelhas do Sistema Computacional TQS v11.0. A análise dos resultados demonstrou que a laje nervurada em estudo apresentou uma tendência ao comportamento linear em todas as etapas de carregamento, sem fissuração da estrutura como um todo, embora os resíduos no processo de descarga tenham sugerido indícios de um início de fissuração em algumas seções isoladas. O comportamento da laje esteve dentro do previsto, com deslocamentos verticais na mesma ordem de grandeza das previsões teóricas e deformações específicas indicando a presença de momentos fletores nas seções instrumentadas coincidentes com os previstos pela análise numérica.

Palavras-chave: laje nervurada, concreto armado, análise matricial de grelhas, instrumentação.

^a Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, paulete.schwetz@ufrgs.br, Av. Osvaldo Aranha, 99 – Térreo, CEP 90035-190, Porto Alegre, Brasil;

^b Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, gastal@ufrgs.br, Av. Osvaldo Aranha, 99 – Térreo, CEP 90035-190, Porto Alegre, Brasil.

^c Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, lcarlos66@gmail.com, Av. Osvaldo Aranha, 99 – Térreo, CEP 90035-190, Porto Alegre, Brasil.

1. Introdução

A análise estrutural de pavimentos de edifícios por meio de métodos numéricos computadorizados constitui-se, atualmente, em rotina nos escritórios de projeto. O cálculo e detalhamento com o auxílio de programas de computador é praticamente imprescindível, devido principalmente ao ritmo imposto pelos contratantes do projeto estrutural e a necessidade de avaliar as diversas possibilidades de sistemas procurando, dessa forma, a que apresente viabilidade econômica, rapidez e versatilidade de aplicação (DIAS [1]).

Seguindo esta tendência, as lajes nervuradas vêm se firmando gradativamente como uma solução atraente. Este sistema estrutural pode ser definido como um conjunto de nervuras, distribuídas

em uma ou mais direções, regularmente espaçadas entre si, integralizadas por uma capa de concreto (PEREIRA [2]).

O sistema nervurado é uma evolução natural das lajes maciças, pois resulta da eliminação da maior parte do concreto abaixo da linha neutra, o que permite o aumento econômico da espessura total das lajes pela criação de vazios em um padrão rítmico de arranjo. Com isso tem-se um alívio do peso próprio da estrutura e um aproveitamento mais eficiente dos materiais, aço e concreto. A análise estática linear das lajes nervuradas tem por objetivo determinar o valor e a distribuição das forças cortantes e dos momentos fletores e torçores atuantes na estrutura, a fim de dispor, em cada seção da peça, a armadura necessária para resistir de forma satisfatória a estes esforços. Além disso, torna-se fundamental a avaliação, pelo projetista, das deformações que ocorrerão na estrutura submetida ao carregamento de serviço, a partir de uma análise não-linear da mesma.

Figura 1 - Laje nervurada gerada pelo Modelador Estrutural TQS

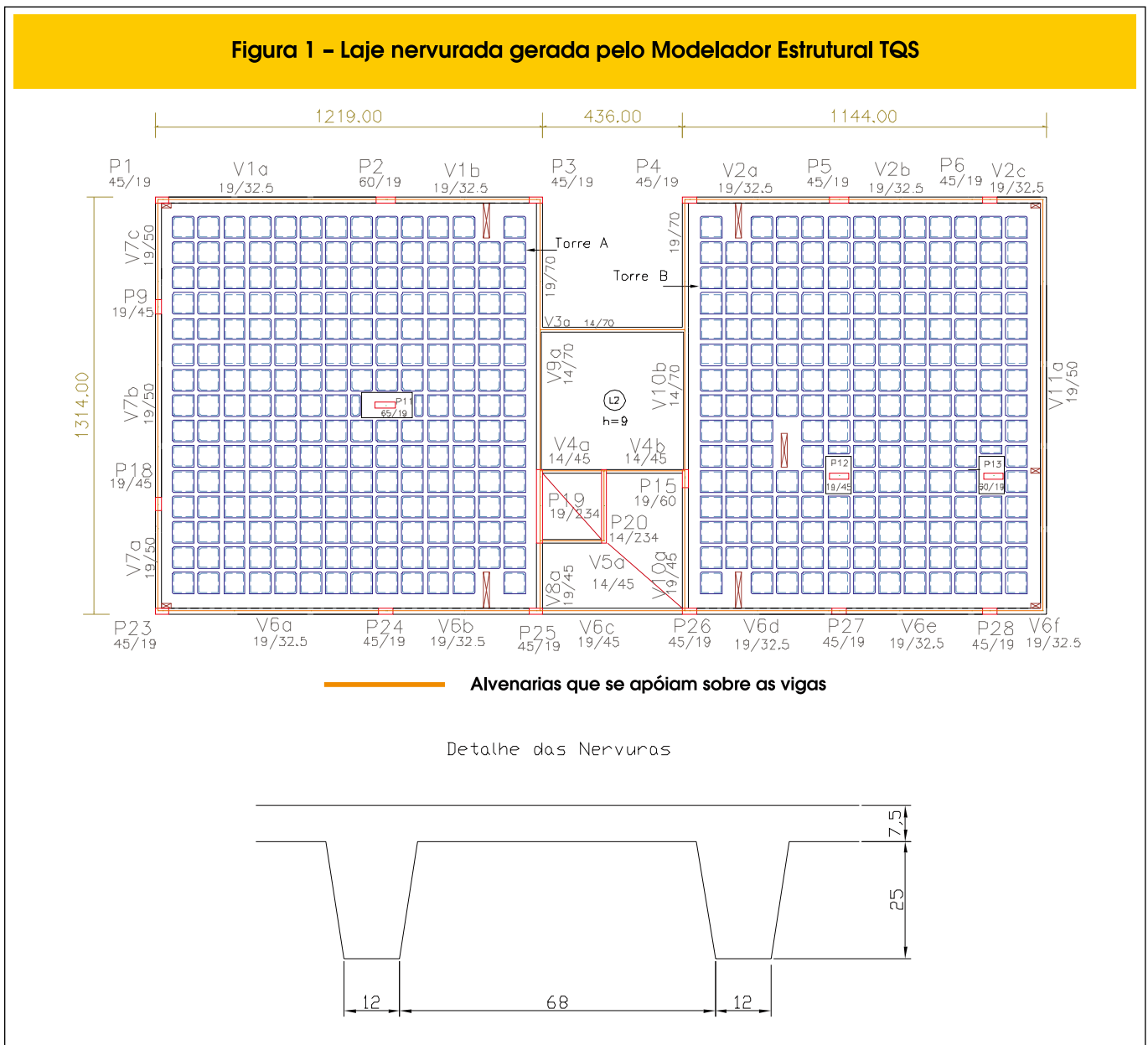
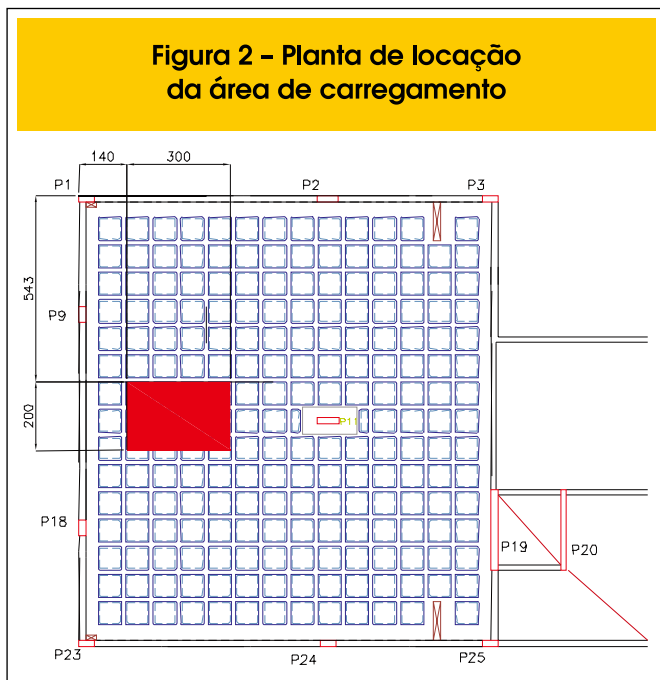


Figura 2 – Planta de localização da área de carregamento



Com relação à força cortante, o maior risco provém do puncionamento da placa pelos pilares, que se caracteriza por ser um fenômeno combinado de tensões normais e tangenciais e por apresentar uma ruptura do tipo frágil. A região circundante aos pilares, que deve resistir aos esforços de punção, bem como a momentos fletores negativos geralmente elevados, deve ser reforçada por maciços, formados pela retirada dos blocos de enchimento (MONTROYA [3]).

No Brasil, a construção civil ainda utiliza predominantemente o método convencional (laje maciça-viga-pilar) na concepção de estruturas de concreto armado. Porém, nos últimos anos, verifica-se um aumento no emprego de lajes nervuradas. Entretanto, ainda é necessário desenvolver procedimentos e normas que orientem a utilização deste tipo de sistema construtivo.

O conhecimento sobre a quantificação das solicitações e o comportamento de lajes nervuradas de concreto armado ainda é bastante escasso, apesar de existirem algumas pesquisas numéricas e experimentais sobre este sistema estrutural (Ajdukiewicz & Kliszczewicz 1986 [4]; Selistre 2000 [5]; Abdul-Wahab & Khalil 2000 [6]; Soares 2003 [7]; Schwetz 2005[8]).

Tradicionalmente, as lajes nervuradas sempre foram analisadas por meio de métodos simplificados, derivados dos procedimentos criados para lajes maciças, adaptados de tabelas baseadas na Teoria da Elasticidade. Todavia, as análises experimentais confirmam que isso não é adequado, pois essa geometria de laje não consegue desenvolver os mesmos momentos de torção de uma laje maciça e, conseqüentemente, apresenta momentos fletores e deslocamentos maiores.

Com o objetivo de compreender melhor o comportamento de lajes nervuradas de concreto armado e, quantificar, ainda que pontualmente, as solicitações da estrutura de uma forma mais realista, foi realizado um programa experimental, onde foram medidas deformações específicas e deslocamentos verticais em uma laje nervurada em escala natural. Os resultados experimentais foram comparados com os de uma análise computacional dessa estrutura.

2. Análise Numérica

Métodos numéricos e programas computacionais cada vez mais sofisticados estão sendo adotados no cálculo de estruturas de concreto armado. Dentre os métodos disponíveis, os mais utilizados para a resolução de estruturas complexas, como as lajes nervuradas, são aqueles que as consideram como grelhas seguindo os procedimentos de análise matricial ou o método dos elementos finitos.

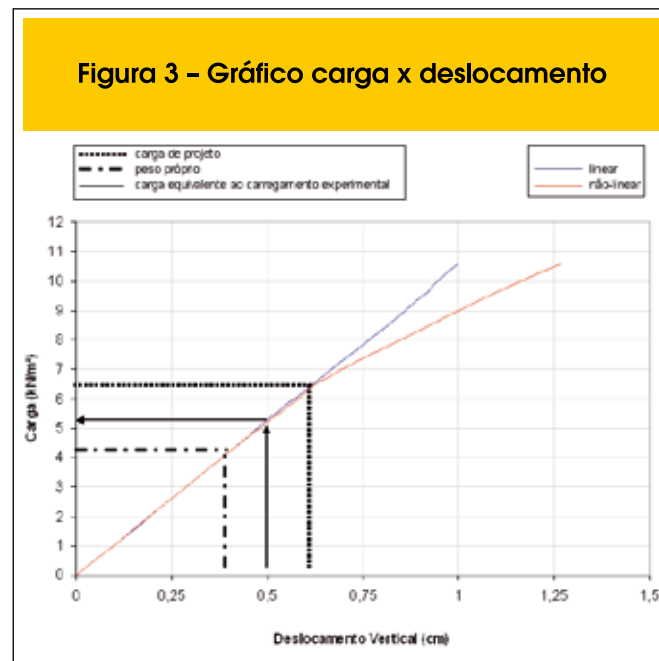
No presente trabalho, a análise numérica foi realizada empregando-se a análise matricial de grelhas. Para tanto, utilizou-se o programa CAD/TQS para Windows, versão 11.0, por ter sido esse o adotado no projeto da estrutura em estudo, conforme indicado no item 2.1 (TQS[9]).

O Sistema TQS permite que a análise da grelha seja linear ou não-linear. Na análise linear, as armaduras não são consideradas na determinação da rigidez das seções transversais. A análise não-linear calcula os deslocamentos verticais, considerando a armadura adotada e a não linearidade física do concreto por conta da fissuração, segundo recomendações da NBR 6118:2003 (ABNT[10]). A consideração da não-linearidade física possibilita uma avaliação dos efeitos da perda de rigidez dos elementos estruturais proveniente de fissuração, que pode acarretar acréscimos de deslocamentos em relação à análise linear, podendo a estrutura atingir o estado limite de utilização por deformações excessivas.

2.1 Geometria e Carregamento da Laje

O modelo de laje nervurada utilizado neste trabalho foi projetado comercialmente por uma empresa de projeto e cálculo de estruturas na cidade de Porto Alegre, Brasil, que adotou para a análise estrutural o programa CAD/TQS para Windows. A modelagem da estrutura foi feita diretamente no modelador estrutural do programa TQS, tendo tido o projetista o cuidado de definir seus próprios

Figura 3 – Gráfico carga x deslocamento



Quadro 1 – Resultados de deslocamentos verticais para carga de projeto e carga localizada

Resultados de Deslocamentos Verticais		
	linear (cm)	não-linear (cm)
Peso Próprio	0,38	0,38
Carga Total de Projeto	0,62	0,67
Carga Localizada, incluindo peso próprio	0,50	0,51

critérios de projeto. O piso analisado neste estudo foi o de cobertura, cuja forma final, com as respectivas propriedades geométricas, pode ser visualizada na figura 1.

Conforme mostrado no desenho, o projeto é composto por duas torres (aqui identificadas como Torre A e Torre B) interligadas por uma região onde se localizam o elevador e a escada. Como havia a impossibilidade da realização do programa experimental nas duas torres, optou-se pela análise apenas da torre A.

O projetista decidiu adotar um vigamento de borda com o objetivo de causar enrijecimento para evitar deformações excessivas. A região circundante ao pilar central, que apresenta momentos fletores negativos e punção, foi reforçada, considerando-se uma região em laje maciça com uma altura de 32,5 cm.

O carregamento total adotado no projeto original previa, além do peso próprio da estrutura de 4,1 kN/m², uma carga permanente de 1,5 kN/m² e uma carga acidental de 1,0 kN/m². Em função da inviabilidade de carregamento de toda a área da laje durante o programa experimental, optou-se por carregar apenas uma parte da mesma. Com o objetivo de determinar para a área a ser carregada uma posição e um valor de carregamento, a estrutura foi objeto de várias análises numéricas. Nessas análises, posição e valor de carga foram variados, com o propósito de se obter como resultados deslocamentos e momentos fletores de uma mesma ordem de grandeza daqueles resultantes a partir da aplicação do carregamento total do projeto original da estrutura e passíveis de medição experimental. Dessas análises, foi definida como área adequada para o carregamento experimental a indicada na figura 2 e o valor de carga adotado foi 6,6 kN/m².

Quadro 2 – Resultados de momentos fletores para carga de projeto e carga localizada

Resultados de Momentos Fletores	
	linear (kNm)
Peso Próprio	14,9
Carga Total de Projeto	24,9
Carga Localizada, incluindo peso próprio	19,9

Os Quadros 1 e 2 apresentam, respectivamente, os resultados de deslocamento e momento fletor na região definida de aplicação da carga experimental para os seguintes carregamentos: somente peso próprio da laje, carregamento total de projeto e carga localizada, incluindo o peso próprio.

A figura 3 apresenta os deslocamentos correspondentes aos incrementos de uma carga uniformemente distribuída em toda a laje para um ponto localizado na região de aplicação do carregamento experimental.

Verifica-se, no Quadro 1, que o deslocamento provocado pela carga localizada, incluindo o peso próprio, é 0,5 cm, o que equivaleria à aplicação de uma carga distribuída em toda a laje correspondente a metade da soma das cargas permanente e acidental de projeto, conforme podemos observar na figura 3. O Quadro 2 apresenta conclusão semelhante com relação ao momento fletor nessa região.

A resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) adotada no projeto foi de 30 MPa. Os cobrimentos foram definidos segundo a NBR 6118:2003 (ABNT [10]), bem como o coeficiente de Poisson, cujo valor empregado foi $\nu = 0,2$. Admitiu-se um peso específico do concreto armado equivalente a $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ e o módulo de elasticidade longitudinal considerado foi $E = 26 \text{ GPa}$, que foi o módulo especificado pelo projetista da estrutura. Os critérios de projetos utilizados no programa computacional foram os mesmos adotados pelo projetista da estrutura, como definido a seguir.

2.2 Principais Critérios de Projeto adotados no CAD/TQS

O sistema TQS Windows versão 11.9.9 oferece a possibilidade da adoção de critérios de projeto que permitem a adequação do cálculo de esforços solicitantes e detalhamento final dos desenhos de armação à prática usual de projeto de cada projetista estrutural.

Os principais critérios adotados neste projeto estão relacionados a seguir.

■ Apoios

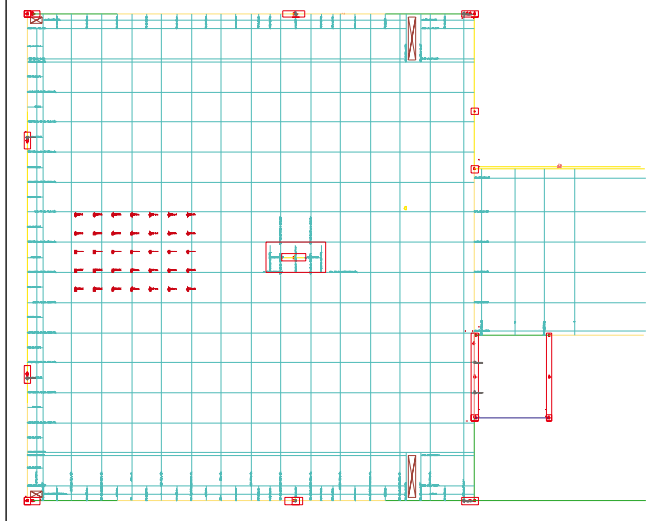
O critério adotado para apoios nos pilares é denominado pelo programa de apoio elástico independente, onde cada viga tem um vínculo independente no pilar, definido por coeficientes de mola nas direções X e Y. Esses coeficientes permitem a redução da condição de engastamento entre as vigas e os pilares. O valor adotado para o coeficiente redutor foi 4, que é o valor padrão do programa.

Além das molas na direção X e Y, uma mola na direção Z pode ser introduzida. O valor adotado para o coeficiente redutor da mola na direção Z foi 1, que é o valor padrão do programa.

■ Plastificação sobre pilares internos às lajes nervuradas

Nos pilares intermediários, diversos tipos de controle são usados para simular a plastificação e permitir a consideração de torção nas barras do maciço em volta do pilar. Para tanto, as barras dentro do maciço são separadas dos demais, podendo receber maior inércia à torção e menor inércia à flexão. O programa estende as nervuras para dentro do maciço, completando com barras os espaços intermediários entre as nervuras. A soma da largura das barras em cada direção é igual à largura do maciço, sendo que as barras de borda têm meia largura. As barras internas do maciço recebem um valor para o divisor de inércia à torção, enquanto que as de borda podem receber outro divisor. Neste projeto, o divisor de inércia a torção das

Figura 4 - Grelha gerada automaticamente pelo GRELHA-TQS



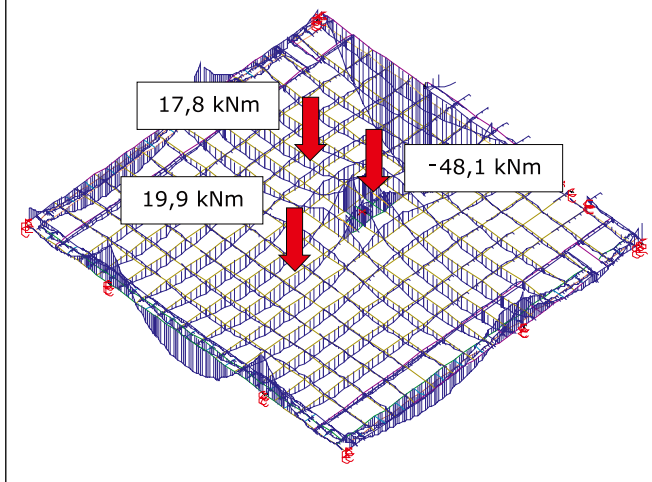
barras internas e das barras externas do maciço foi o mesmo e o valor adotado foi 6, que é o padrão do programa.

Além disso, todas as barras do maciço têm sua inércia à flexão reduzida por um parâmetro, simulando uma plastificação, que tende a distribuir mais os esforços de flexão positivos nas barras da grelha. O parâmetro de redução neste projeto foi adotado como sendo igual a 1,6.

■ Torção nas barras da grelha

O Sistema Cad/TQS permite a consideração do esforço de torção nas barras da grelha, embora não seja o critério padrão do programa. Neste projeto, o momento torçor foi absorvido apenas pelos pilares e vigamento de borda.

Figura 6 - Distribuição de momentos fletores da laje sujeita ao carregamento localizado e peso próprio - Análise linear



2.3 Resultados da Análise Numérica

Fornecidos os dados, o programa gerou automaticamente o modelo numérico da laje, formado por 1335 nós e 2276 barras, mostrado na figura 4. Os pontos em marrom indicam a área de aplicação do carregamento.

2.3.1 Análise Numérica com carregamento localizado, incluído o peso próprio da estrutura

As figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, a configuração de-

Figura 5 - Deslocamentos da laje submetida ao carregamento localizado e peso próprio - Análise linear

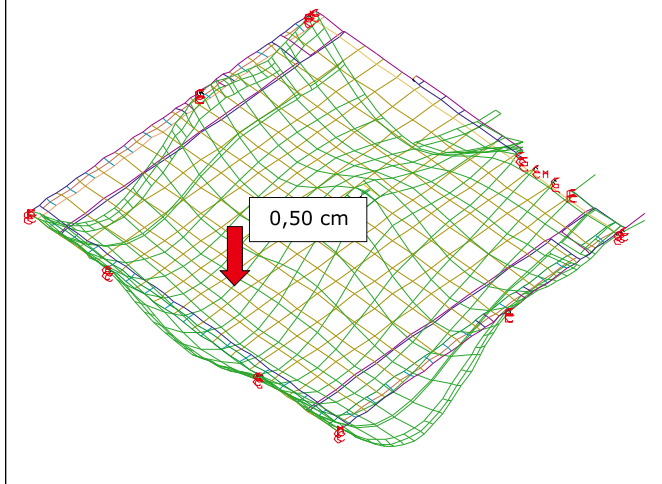


Figura 7 - Deslocamento máximo fornecido pela análise não-linear da grelha sujeita ao carregamento localizado e peso próprio

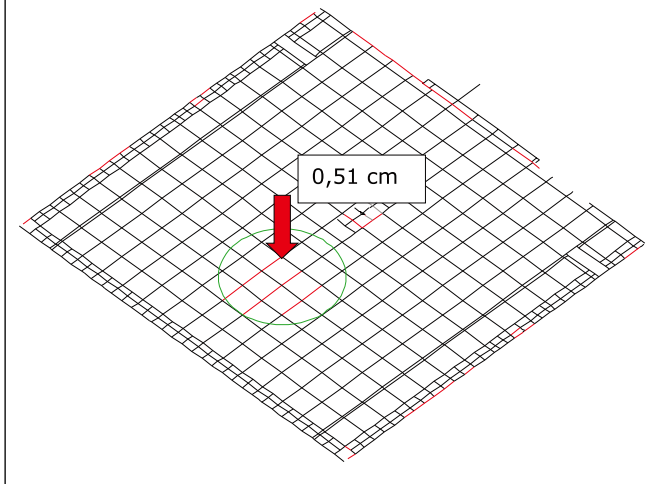


Figura 8 – Deslocamentos da laje submetida ao peso próprio – Análise linear

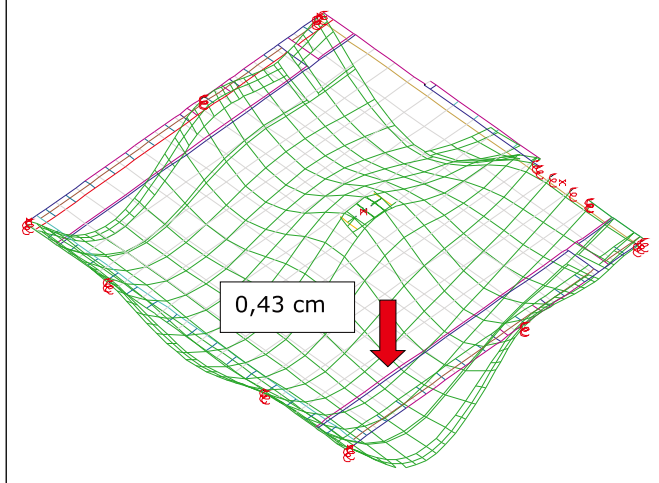
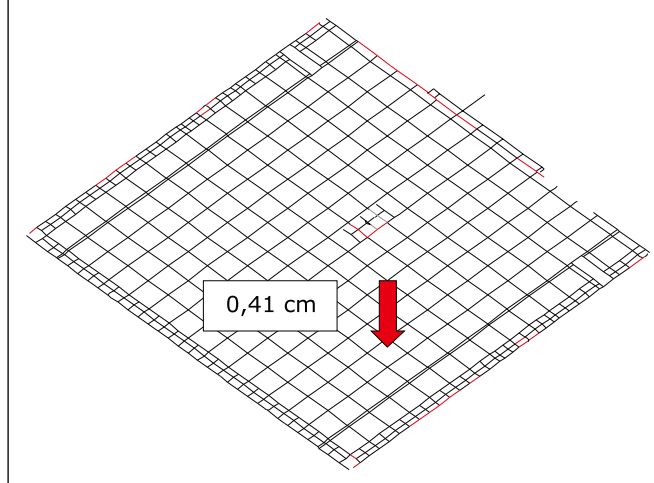


Figura 10 – Resultado da análise não-linear da grelha sujeita ao peso próprio



formada da laje e a distribuição de momentos fletores na mesma para o carregamento localizado, levando-se em conta seu peso próprio. Os resultados apresentados foram obtidos a partir do processamento linear da grelha.

Realizada a análise não-linear da grelha, para a verificação dos deslocamentos verticais máximos, obteve-se o resultado visualizado na figura 7. As linhas em vermelho representam as posições onde a análise numérica prevê a fissuração das barras.

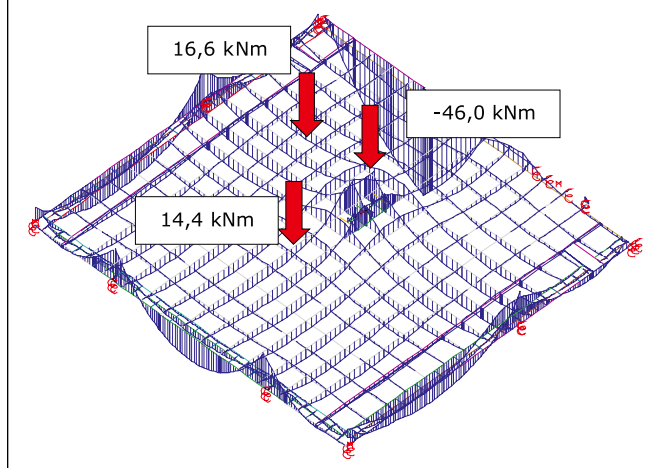
O Sistema Computacional TQS não permite que a análise da estrutura seja feita sem a consideração de seu peso próprio. Em função do ensaio da estrutura ter medido os valores de deslocamentos verticais da laje apenas devido à aplicação do carregamento

localizado, optou-se por fazer também uma análise numérica do modelo adotando como carregamento apenas seu peso próprio. Desta forma, o resultado numérico referente ao deslocamento vertical devido apenas ao carregamento localizado foi considerado como a diferença dos valores obtidos pelas duas análises.

2.3.2 Análise Numérica considerando apenas o peso próprio da estrutura

As figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, a configuração deformada da laje e a distribuição de momentos fletores na mesma, carregada apenas com seu peso próprio, a partir de uma análise linear da grelha. Foi realizada, também, a análise não-linear, que apresentou o deslocamento vertical representado na figura 10, onde se pode observar que não existe previsão de fissuração das barras da grelha devido ao carregamento da estrutura apenas pelo seu peso próprio. A previsão de deslocamento vertical feita pela análise não-linear para este carregamento é ligeiramente inferior à prevista pela análise linear. Este comportamento ocorreu em função da associação de dois fatores. O primeiro diz respeito ao fato de que o peso próprio não provocou a fissuração da laje, não tendo ocorrido, portanto, perda de rigidez da seção e o segundo que a análise linear da grelha não leva em consideração a armadura. Portanto, na análise não-linear, onde a armadura é considerada, a estrutura apresenta-se mais rígida.

Figura 9 – Distribuição de momentos fletores da laje sujeita ao peso próprio – Análise linear



3. Programa Experimental

O programa experimental foi elaborado com o objetivo de medir deformações e deslocamentos verticais em seções características da laje nervurada analisada numericamente.

A fôrma para moldagem da laje foi montada com o sistema de cubetas recuperáveis para lajes nervuradas desenvolvido pela empresa Ulma Brasil Fôrmas e Escoramentos Ltda. Este sistema é composto por uma estrutura modular que serve de apoio para as fôrmas plás-

Figura 11 – (a) Estrutura modular com cubeta inserida e (b) Sistema de escoramento



(a)



(b)

ticas (figura 11a). A estrutura modular é apoiada por um conjunto de escoras metálicas tubulares de fácil desmontagem (figura 11b). A armadura da laje foi elaborada com aços tipo CA 50 e CA 60, cujo resumo pode ser visualizado nos Quadros 3 e 4. A figura 12 mostra a posição genérica da ferragem nas nervuras, onde pode se observar que, além das armaduras positivas e negativas pre-

vistas pela análise numérica, o projetista da estrutura colocou uma tela soldada de aço CA-60 produzida pela empresa Gerdau S.A., cuja especificação é Q61, na parte inferior da capa. Esta malha foi colocada antevendo uma possível tração nas fibras inferiores da capa nos vazios da laje nervurada. Na figura 13, pode-se observar a laje pronta para concretagem.

Quadro 3 – Resumo da armadura positiva utilizada na laje

Aço	BIT (mm)	Compr. (m)	Peso (kg)
CA 50	6.3	67	17
CA 50	10	836	527
CA 50	12.5	1280	1280
CA 50	16	169	271
CA 50	20	24	60

Peso total CA 50: 2154 kg

Quadro 4 – Resumo da armadura negativa utilizada na laje

Aço	BIT (mm)	Compr. (m)	Peso (kg)
CA 60	5	33	5
CA 50	6.3	739	185
CA 50	10	670	422
CA 50	12.5	339	339
CA 50	16	103	164
CA 50	20	22	55

Peso total CA 60: 5 kg; Peso total CA 50: 1165 kg

3.1 Instrumentação

Foram colados 6 extensômetros elétricos no concreto em três pontos da estrutura. Cada extensômetro colado na superfície inferior da laje teve como correspondente um colado na parte superior da mesma (figura 14). Com o objetivo de medir deslocamentos verticais a partir do carregamento localizado, a laje foi instrumentada com 5 deflectômetros. Esses medidores foram fixados em bases de concreto, niveladas e posicionadas na laje do pavimento inferior (figura 15). A locação dos pontos de instrumentação pode ser visualizada na figura 16.

3.2 Ensaio da Estrutura

O ensaio foi realizado 46 dias após a concretagem da estrutura. O carregamento foi aplicado em 4 etapas, utilizando-se sacos de

Figura 12 – Posição genérica das armaduras na nervura

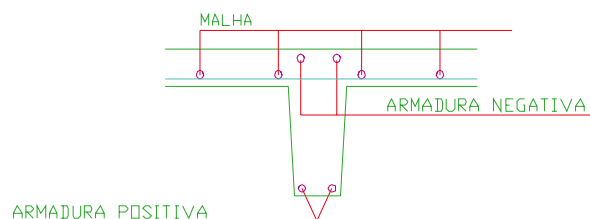


Figura 13 – Fôrma pronta para concretagem



Figura 15 – Deflectômetro posicionado



especificações da NBR 5739:1994 (ABNT [12]). O valor obtido foi $f_{ck} = 37,2$ MPa.

argamassa pesando, unitariamente, 50 kg (figura 17). Finalizado o carregamento, a laje foi descarregada, também em 4 etapas. Ao final de cada etapa de carga e/ou descarga, foram lidos os valores nos deflectômetros e, por meio eletrônico, as deformações dos extensômetros, através de um sistema de aquisição de dados. Foram realizados, também, ensaios complementares para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal do concreto (E) e da resistência característica (fck). O valor do módulo de deformação longitudinal do concreto medido experimentalmente foi determinado a partir do ensaio de corpos de prova cilíndricos submetidos a forças axiais de curta duração. A partir dos resultados das leituras, foram traçados os gráficos tensão x deformação e foi determinado o valor do módulo de deformação longitudinal secante do concreto para cada corpo-de-prova, segundo recomendação da norma brasileira NBR 8522:1984 (ABNT [11]). O valor médio do módulo de deformação longitudinal do concreto medido experimentalmente foi $E = 35,74$ GPa. A resistência característica do concreto foi determinada a partir do ensaio de compressão simples de corpos de prova, segundo as

4. Análise dos Resultados

Após o ensaio, a grelha representativa da laje, que havia sido

Figura 16 – Planta de localização dos pontos de instrumentação

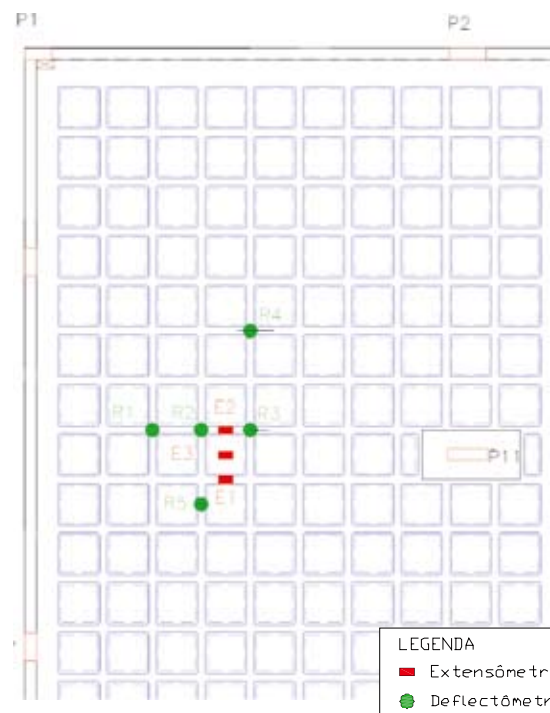


Figura 14 – Localização dos extensômetros na nervura

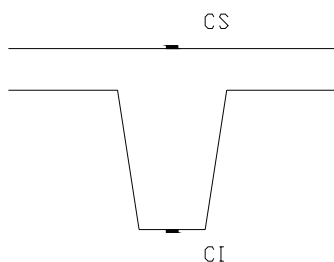


Figura 17 - Estrutura carregada



previamente analisada numericamente com o valor da resistência característica (f_{ck}) e do módulo de deformação longitudinal (E) adotados no projeto estrutural, foi reprocessada, com os valores obtidos experimentalmente para as mesmas.

Figura 20 - Gráfico carga x deslocamento vertical do deflectômetro R3

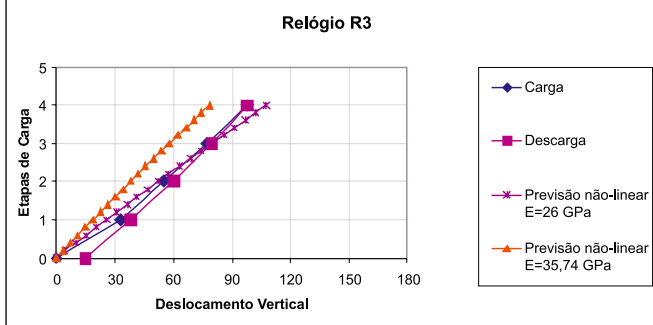


Figura 18 - Gráfico carga x deslocamento vertical do deflectômetro R1

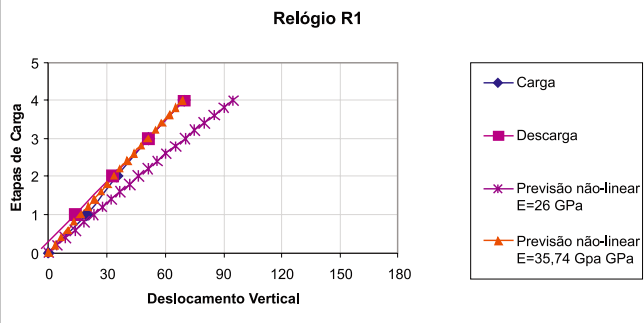


Figura 21 - Gráfico carga x deslocamento vertical do deflectômetro R4

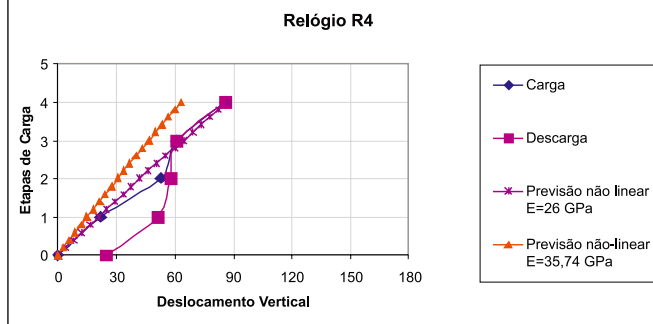


Figura 19 - Gráfico carga x deslocamento vertical do deflectômetro R2

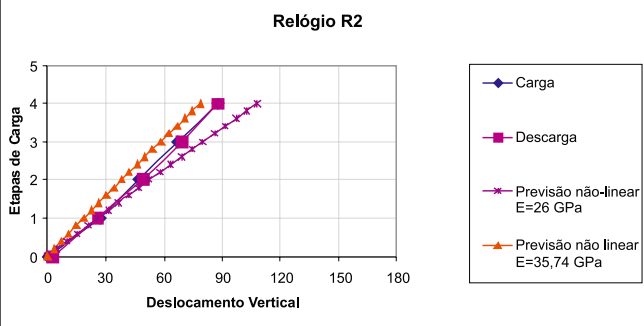
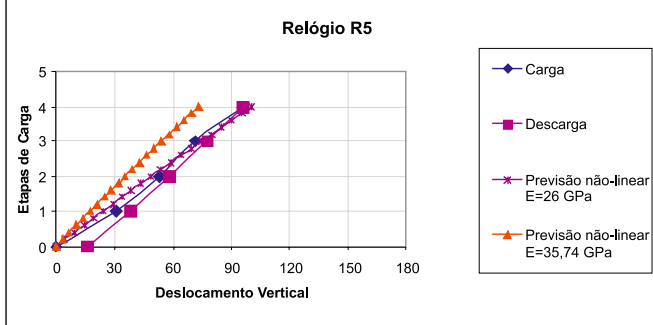


Figura 22 - Gráfico carga x deslocamento vertical do deflectômetro R5



As previsões numéricas foram, então, comparadas com os dados experimentais. Adotaram-se, como parâmetros de comparação,

os valores das deformações específicas e dos deslocamentos verticais nos pontos de controle anteriormente enumerados.

Quadro 5 – Valores estimados de deformações específicas teóricas nos Estádios I e II para os módulos de elasticidade longitudinal E= 35,74 GPa e E= 26 GPa

Etapa de Carga	Seção	Momento Fleitor (kNm)	Estádio I				Estádio II			
			$\epsilon_{sup} (x10^{-6})$	$\epsilon_{inf} (x10^{-6})$	$\epsilon_{sup} (x10^{-6})$	$\epsilon_{inf} (x10^{-6})$	$\epsilon_{sup} (x10^{-6})$	$\epsilon_{inf} (x10^{-6})$	$\epsilon_{sup} (x10^{-6})$	$\epsilon_{inf} (x10^{-6})$
			(E=26 GPa)	(E=26 GPa)	(E=35,74 GPa)	(E=35,74 GPa)	(E=26 GPa)	(E=26 GPa)	(E=35,74 GPa)	(E=35,74 GPa)
1	1	1,38	-5,89	11,96	-4,35	9,03	-10,24	88,1	-8,57	86,83
	2	1,43	-6,11	12,39	-4,51	9,36	-10,45	68,31	-8,75	67,66
2	1	2,75	-11,79	23,92	-8,71	18,07	-20,48	176,19	-17,15	173,65
	2	2,85	-12,22	24,79	-9,02	18,72	-20,89	136,62	-17,5	135,32
3	1	4,13	-17,68	35,88	-13,06	27,1	-30,71	264,29	-25,72	260,48
	2	4,28	-18,33	37,18	-13,54	28,08	-31,34	204,93	-26,25	202,98
4	1	5,50	-23,58	47,84	-17,41	36,13	-40,95	352,38	-34,3	347,31
	2	5,70	-24,44	49,58	-18,05	37,44	-41,79	273,24	-35	270,64

Figura 23 – Gráfico carga x deformação específica no Ponto 3 – Concreto Superior

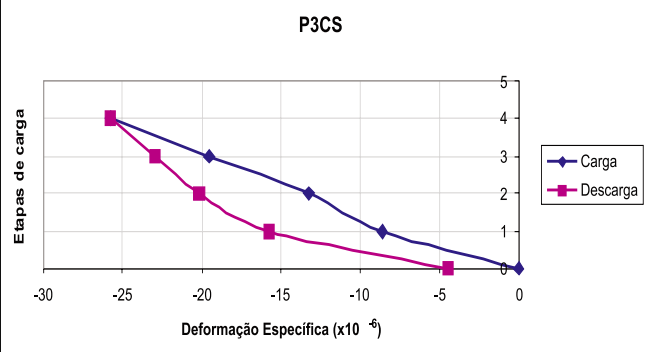


Figura 25 – Gráfico carga x deformação específica no Ponto 1 – Concreto Superior

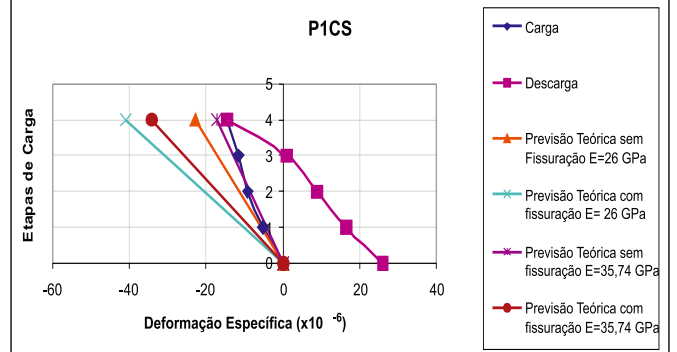


Figura 24 – Gráfico carga x deformação específica no Ponto 3 – Concreto Inferior

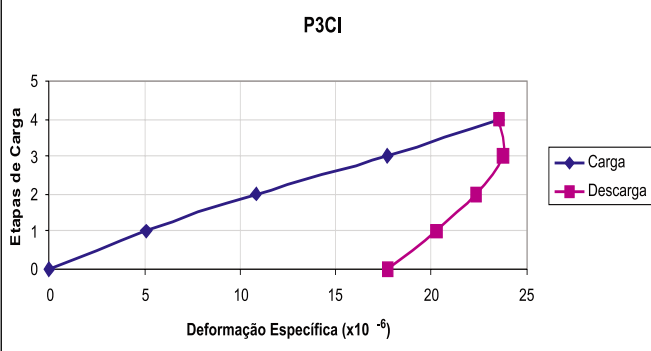


Figura 26 – Gráfico carga x deformação específica no Ponto 1 – Concreto Inferior

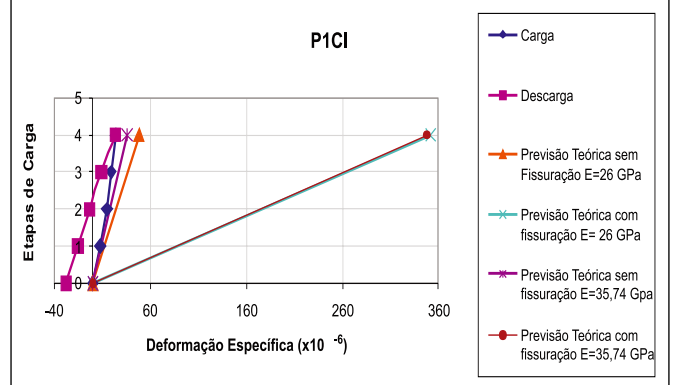
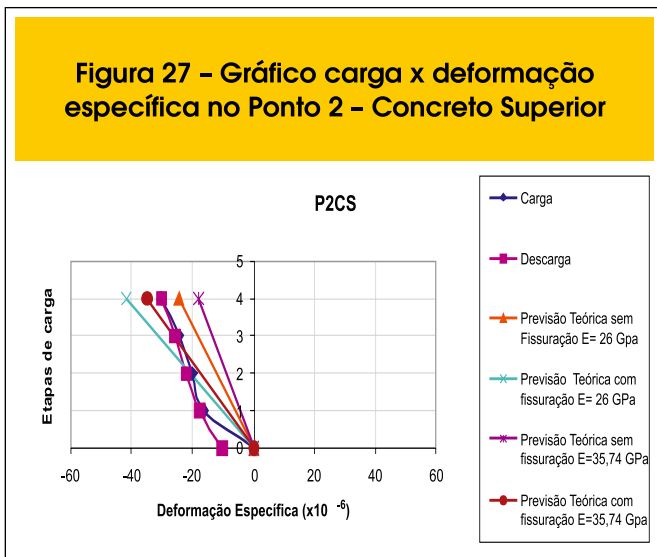


Figura 27 – Gráfico carga x deformação específica no Ponto 2 – Concreto Superior



4.1 Deslocamentos Verticais

Os deslocamentos verticais obtidos numérica e experimentalmente são apresentados nas figuras 18 a 22, em centésimo de milímetro. As previsões numéricas foram obtidas adotando-se o módulo de elasticidade medido experimentalmente e o módulo de elasticidade especificado pelo projetista da estrutura.

Os valores numéricos são todos resultados da análise não-linear da grelha, visto que esta análise tende a apresentar resultados teóricos para os deslocamentos verticais mais próximos da realidade.

Analisando as figuras, observa-se que a laje teve comportamento linear durante as etapas de carregamento da estrutura. Constata-se ainda, que os valores experimentais ficaram bastante próximos das previsões numéricas. Os gráficos indicam que nos pontos de controle 1 e 2 os deslocamentos verticais medidos ficaram próximos às previsões teóricas adotando-se o módulo de elasticidade medido experimentalmente. Já nos pontos 3, 4 e 5 os deslocamentos verticais experimentais aproximaram-se das previsões numéricas adotando-se o módulo de elasticidade solicitado em projeto.

Torna-se importante salientar que os relógios 3, 4 e 5 apresentaram resíduo na etapa de descarga, o que pode indicar um início de fissuração da estrutura no entorno destes pontos após o carregamento total, muito embora as seções não tenham apresentado sinais visuais de fissuração.

4.2 Deformação Específica

A partir dos valores de momento fletor previstos pela análise numérica, foi possível determinar as deformações específicas para cada seção estudada, com o objetivo de estabelecer a comparação com os dados obtidos experimentalmente.

Para tanto, foram determinadas as inércias da seção, fissurada e não fissurada, considerando a contribuição das armaduras, pelo Método da Seção Transformada (PARK [13]).

Desta forma, determinaram-se as tensões no concreto e na armadura e consequentemente, as deformações específicas teóricas nos Estádios I e II definidos pela NBR 6118:2003 (ABNT [6]),

adotando-se o módulo de elasticidade medido experimentalmente e o módulo especificado pelo projetista da estrutura. Os valores obtidos podem ser visualizados no Quadro 5.

As figuras 23 a 28 apresentam os gráficos dos valores de deformações específicas experimentais e teóricas para cada etapa de carregamento, em cada seção instrumentada.

Torna-se importante salientar que, como o SISTEMA TQS calcula a laje nervurada como um conjunto de vigas “T” justapostas, não existe uma previsão teórica para momento fletor na região da capa, razão pela qual se apresenta para o ponto de controle 3 apenas os resultados experimentais. Estes poderão ser comparados com uma futura análise por elementos finitos.

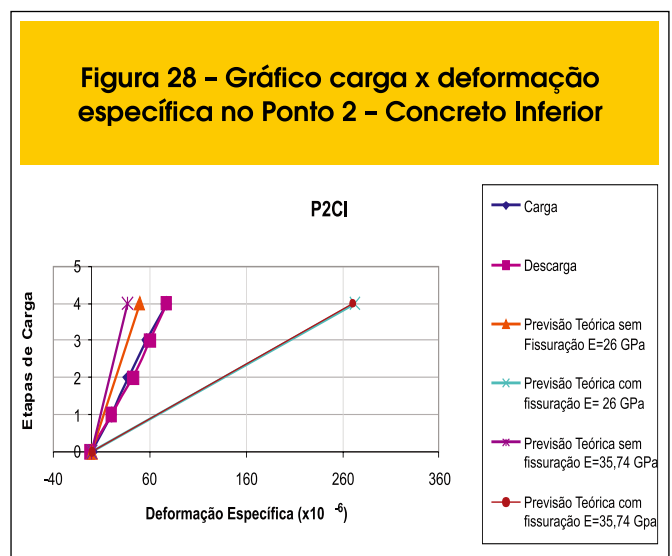
Analisando os gráficos das deformações, observa-se que a laje apresentou tração nas fibras inferiores e compressão nas superiores, indicando a presença de momentos fletores positivos nestas seções, coincidindo com a previsão da análise numérica. Constata-se, ainda, que a laje teve comportamento muito próximo ao linear, ao longo do ensaio de carregamento, sugerindo que não ocorreu fissuração, ou seja, que a estrutura permaneceu no Estádio I, confirmando a tendência mostrada pelos resultados dos relógios comparadores.

Os gráficos mostram, ainda, um resíduo no processo de descarga. Estas leituras podem indicar que estes extensômetros provavelmente estavam colados em seções não fissuradas do concreto, localizadas próximas a uma área onde pode ter se iniciado um processo de fissuração, após o carregamento da laje. Desta forma, embora a estrutura como um todo permanecesse no Estádio I, algumas seções poderiam ter começado a fissurar.

Observa-se, também, que o ponto de controle 1 apresentou valores de deformação específica experimental bastante próximos às previsões teóricas de Estádio I com módulo de elasticidade longitudinal E = 35,74 GPa. Já no ponto 2, os valores de deformação específica experimental excederam os valores previstos pela análise numérica para Estádio I com módulo de elasticidade longitudinal E = 26 GPa, indicando uma flexibilização da estrutura, confirmando a possibilidade de alguma fissuração no entorno deste ponto, como indicado na análise numérica, item 2.2.1.

É importante ressaltar que os valores experimentais medidos em todas as seções ficaram bastante aquém das previsões teóricas para o Estádio II, confirmando a premissa de que se houve alguma

Figura 28 – Gráfico carga x deformação específica no Ponto 2 – Concreto Inferior



fissuração na estrutura, esta ocorreu em pontos isolados, praticamente numa zona de transição entre o Estádio I e o Estádio II. As figuras 23 e 24 indicam a presença de flexão na capa na região de vazio entre as nervuras, confirmando a necessidade de disposição da tela soldada prevista pelo projetista.

5. Considerações Finais

A análise dos resultados demonstrou que a laje nervurada em estudo apresentou uma tendência ao comportamento linear em todas as etapas de carregamento, permanecendo no Estádio I, ou seja, que não houve fissuração da estrutura como um todo, mas apenas em algumas seções isoladas, como previsto numericamente. Observou-se, ainda, que os deslocamentos da laje estiveram próximos aos previstos, com valores experimentais na mesma ordem de grandeza das previsões teóricas. As deformações específicas experimentais também indicaram a presença de momentos fletores coincidentes com os previstos pela análise numérica.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e às empresas *Projetak – Tavares Eng. Associados S/C Ltda* e *Maiojama Participações* pelo apoio na realização desta pesquisa.

7. Referências

- [01] DIAS, R. H. Análise Numérica de Pavimentos de Edifícios em Lajes Nervuradas. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2003.
- [02] PEREIRA, V. F. Projeto de lajes treliçadas armadas em duas direções. Artigo Técnico. Disponível em: <http://www.ufes.br/~ctjr/outeng/artigos/art4.pdf>. Acesso em 06/12/2003.
- [03] MONTOYA P.J.; MESEGUER A.G.; CABRE, F.M. Hormigón armado. 10 ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S. A., [197-].
- [04] AJDUKIEWICZ, A.; STAROLSKI, W. Reinforced-concrete slab-column structures. New York: Elsevier Science Publishers, 1990.
- [05] SELISTRE, S. L.C. Análise Teórico-Experimental de uma Laje Nervurada de Microconcreto Submetida a um Carregamento Uniformemente Distribuído. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- [06] ABDUL-WAHAB, H. M. S.; KHALIL, M. H. Rigidity and Strength of Orthotropic Reinforced Concrete Waffle Slabs. *Journal of Structural Engineering*, v. 126, n. 2, Feb., p. 219-227, 2000.
- [07] SOARES, Y.V. Análise Experimental de Lajes Cogumelo Nervuradas de Concreto Armado com Pilares Metálicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2003.
- [08] SCHWETZ, P. F. Análise teórico-experimental de uma laje nervurada modelo reduzido sujeita a um carregamento linear. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- [09] TQS Informática Ltda. (a). *Sistemas Computacionais – Engenharia Estrutural: CAD/Formas*. São Paulo, s.d. várias paginações.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2003 : Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 2004.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522:1984 : concreto – determinação do módulo de deformação estática e diagrama – tensão de deformação – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:1994 : concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- [13] PARK R.; PAULAY T. *Reinforced Concrete Structures*. University of Canterbury, Christchurch, New Zeland, 1975.