

Analysis of accidental loads on garage floors

Análise de cargas acidentais em pavimentos de garagem

D. A. TENÓRIO ^a
daniel@emuchoa.com.br

P. C. C. GOMES ^b
pgomes@ctec.ufal.br

J. M. DÉSIR ^c
jean.marie@ufrgs.br

E. L. M. UCHÔA ^a
edward@emuchoa.com.br

Abstract

The focus of the paper is the analysis of accidental loads used for garage floors considering the recommendations of national and international norms on the load values to be applied on those floors. The Brazilian norm NBR 6120/1980 [1], on the subject, does not specify concentrated loads while Euro Code [2] and IBC international [3] norms recommend that distributed and concentrated loads shall be considered. Currently, waffle slabs are widely used in garage floors. In this context, considering the standards of the most used vehicles in the country, we ask: are the values of the distributed loads from the norms suitable for slab design? Or is it necessary to correct these loads to account for concentrated loads on the order of 8.5 kN per share corresponding to a utility vehicle tire? The objective of the present study is to find answers for those two questions through parametric analysis involving the main parameters of a waffle slab, which are: side ratio λ (lambda), spacing between the main ribs and scheme of slab support (one-way or two-way) The set of simulations shows that the loads recommended by the mentioned norms need to be corrected when used in garage floors to reproduce the effect of the loads concentrated in the tires of utility vehicles.

Keywords: accidental load, garage floor, one-way waffle slab and two-way ribbed slab, finite element method.

Resumo

O trabalho tem como foco a análise das cargas acidentais utilizadas para pavimentos de garagem, considerando as recomendações de normas nacionais e internacionais para a definição do valor das cargas a serem aplicadas nas lajes nervuradas. A norma brasileira NBR 6120/1980 [1], que trata do assunto, não especifica nada em relação a cargas concentradas, enquanto normas internacionais como Euro Code [2] e IBC [3], recomendam considerar cargas distribuídas e concentradas. Atualmente, as lajes nervuradas são utilizadas amplamente em pavimentos de garagem. Neste contexto, considerando os padrões de veículos mais utilizados no país, será que os valores de cargas distribuídas das normas são adequados para o dimensionamento das lajes nervuradas? Ou é necessário fazer uma correção destas cargas para levar em consideração as cargas concentradas da ordem de 8,5 kN por pneu correspondente a um veículo utilitário. O objetivo deste trabalho é procurar as respostas para estas duas perguntas através de uma análise paramétrica envolvendo os principais parâmetros de uma laje nervurada, que são: a relação λ (lambda) entre os lados, a distância entre as nervuras principais e o esquema de apoio da laje (uni ou bidirecional). De uma forma geral o conjunto das simulações mostra que as cargas recomendadas pelas normas citadas precisariam de correção quando utilizadas em pavimento de garagem para reproduzir o efeito das cargas concentradas das rodas de veículos tipo utilitário.

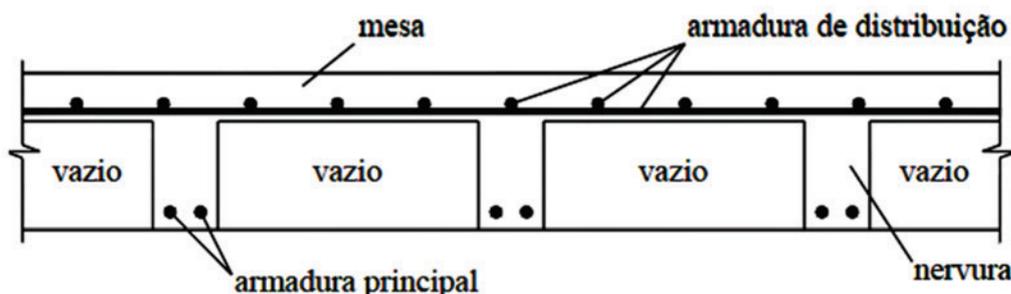
Palavras-chave: carga acidental, pavimento garagem, laje nervurada unidirecional e laje nervurada bidirecional, método dos elementos finitos.

^a E.M. UCHÔA Engenharia, Maceió, AL, Brasil;

^b Instituto PPGEC/UFAL, Maceió, AL, Brasil;

^c Instituto PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

Figura 1 – Estrutura da laje nervurada moldada in loco (Silva, 2005) (4)



1. Introdução

Atualmente, é muito comum incluir em projetos de edifícios de concreto armado vãos livres relativamente grandes destinados a auditórios, sala de exposição, pavimentos de garagem e áreas de lazer. Em tais casos, as lajes precisam ter uma espessura maior para aumentar a rigidez e reduzir as deflexões. Desse modo, as lajes maciças aumentam consideravelmente o peso próprio consideravelmente. Nesse cenário, as lajes nervuradas aparecem como uma solução mais apropriada porque, ao passo que proporcionam aumento na rigidez, garantem também redução de peso. De fato, as lajes nervuradas moldadas no local (LNML) vêm sendo usadas em grande escala em tais situações, por serem economicamente mais viáveis que as maciças e proporcionarem um consumo menor de concreto e aço garantindo assim uma estrutura mais leve (Figura 1).

O conceito de laje nervurada pode ser descrito de uma forma relativamente simples. Quando se têm vãos de 4 m ou mais (Dantas e Nascimento 2009) [5], as lajes maciças apresentam pequena região de concreto comprimido, havendo, portanto, excesso de concreto abaixo da linha neutra na região tracionada, cuja contribuição no dimensionamento à flexão é desprezada. Isso acaba não ajudando na resistência à flexão, mas aumenta consideravelmente o peso próprio da laje. Em virtude desse fato, nada mais racional do que substituí-lo por material inerte ou simplesmente deixar o vazio, gerando um modelo de laje mais econômico e eficiente, a laje nervurada.

Nesse contexto de economia e eficiência, procura-se com a solução da laje nervurada diminuir o consumo de concreto, aço, e aumentar a rigidez à flexão. Além disso, as técnicas de cimbramento aplicadas em lajes nervuradas visam diminuir o custo de fôrmas, evitando a confecção do molde de todas as nervuras. Nas lajes nervuradas, esse inconveniente é superado, por exemplo, com a utilização de moldes reaproveitáveis de plástico reforçado, que suportam não só o peso do concreto fresco, mas também o peso da armadura, dos equipamentos e dos obreiros.

Segundo o item 14.7.7 da NBR 6118:2007 [6], as LNML apresentam zona de tração constituída por nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte. As LNML podem ser lajes nervuradas unidirecional (LNU) e bidirecional (LNB). As LNB (Figura 2) são usadas quando a relação entre os lados não é superior a dois, situação para a qual se tem uma diminuição dos esforços e uma distribuição das ações em todo o seu contorno. As nervuras (longarinas) são parale-

las às direções das bordas de contorno, ortogonais entre si, e apresentam uma mesma distância entre eixo para as duas direções.

A LNU (Figura 3) apresenta um sistema de nervuras diferentes da LNB, havendo nervuras principais e secundárias: as principais são na direção do menor vão, e as secundárias na direção do maior vão. As distâncias entre eixos de nervuras são diferentes entre as duas direções, sendo maiores para as nervuras secundárias e menores para as nervuras principais. Quando as distâncias entre eixos de nervuras são iguais para as duas direções, a laje nervurada deixa de ser unidirecional e passa a ser bidirecional.

No que se refere a um comparativo de consumos de aço e concreto entre LNU e LNB, Tenório *et al.* (2009) [7] apresentaram um estudo mostrando que as LNU são mais econômicas que as LNB, para situações onde a relação entre o maior lado e o menor lado é maior ou igual a 1,4. Sobre o processo de análise das lajes nervuradas, é importante a definição dos carregamentos atuantes, sejam eles concentrados ou distribuídos.

As cargas acidentais para pavimentos de garagem provenientes de diferentes tipos de veículos são muitas vezes superiores às cargas permanentes, principalmente porque atualmente os novos veículos de mercado apresentam cargas superiores a 30 kN, que

Figura 2 – Laje nervurada em duas direções, LNB



Figura 3 – Laje nervurada em uma direção, LNU



são distribuídas entre os pneus em contato com a laje. Os valores e a forma de aplicação dessas cargas seguem recomendações específicas das normas de cada país.

As normas internacionais como EuroCode 1:2002 [2] e o International Building Code 2009 (IBC (2009)) [3] apresentam valores de cargas, correspondentes ao peso do veículo, que devem ser aplicadas no pavimento, através de quatro pequenas áreas que representam o contato dos pneus com a laje. Essas cargas distribuídas em áreas quadradas de lados com dimensões de 0,10 a 0,12 m são consideradas concentradas. Já a norma Brasileira NBR 6120:1980 [1] adota um valor mínimo de carga distribuída por metro quadrado de área que deve ser aplicada na laje, sem a consideração de análise de cargas concentradas que represente o contato do pneu com a laje. Além disso, a norma brasileira, uma norma da década de 80, adota o valor de até 25 kN como a carga máxima de veículos de passageiros, sendo atualmente comum encontrar no mercado veículos com cargas máximas de até 40 kN.

2. Objetivos

Para um pré-dimensionamento ou uma análise simplificada, a aplicação de uma carga distribuída, proporciona maior rapidez na realização dos cálculos. Entretanto, é importante que a carga distribuída aplicada reflita a realidade da situação que se deseja analisar. Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho consiste em definir uma carga equivalente para representar a carga veicular aplicada na laje através do contato do pneu com a mesma, para diferentes configurações de laje nervurada, seja ela uni ou bidirecional. Comparam-se, dentro da análise de LNU e LNB em pavimentos de garagem, os resultados obtidos com a aplicação da carga veicular na forma de cargas concentradas (QC), com a carga distribuída (QD) de acordo com a NBR 6120:1980 [1].

3. Metodologia

Considerando a configuração básica da Figura 4 que mostra uma única laje nervurada, lançada como LNU e LNB, foram realizadas

várias simulações numéricas, para diferentes valores de λ (lambda), de distância entre nervuras principais (DNP), de quantidade nervuras secundárias (QNS), utilizando o método dos elementos finitos através de um programa específico de análise.

A análise da tendência das deflexões revelou dois aspectos interessantes: a possibilidade de comparar as flechas geradas pela carga distribuída (QD), recomendada pela NBR 6120:1980 [1], com as flechas geradas por uma carga concentrada (QC) e a eventual definição de valores de QD que fornecessem flechas iguais às geradas pelo QC. Desta forma, seria possível conduzir uma análise com QD que oferecesse valores próximos a uma análise feita com QC, para cálculo das flechas e momentos nas nervuras, o que representaria uma grande contribuição para melhorar o desenvolvimento dos projetos estruturais de lajes nervuradas, visto que uma análise usando QC é bastante complexa e demorada se comparada com uma análise que utiliza QD.

A altura da laje é definida através de um pré-dimensionamento cujo algoritmo tem sua formulação baseada nas recomendações da NBR 6118:2007 [6] para o cálculo de vigas no estágio II (Tenório, 2011)

Figura 4 – Estrutura básica dos modelos de cálculo

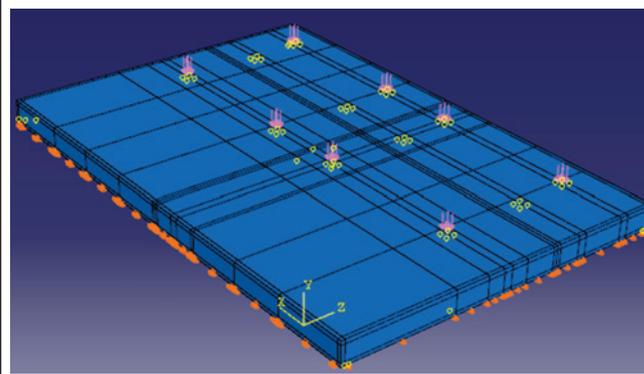
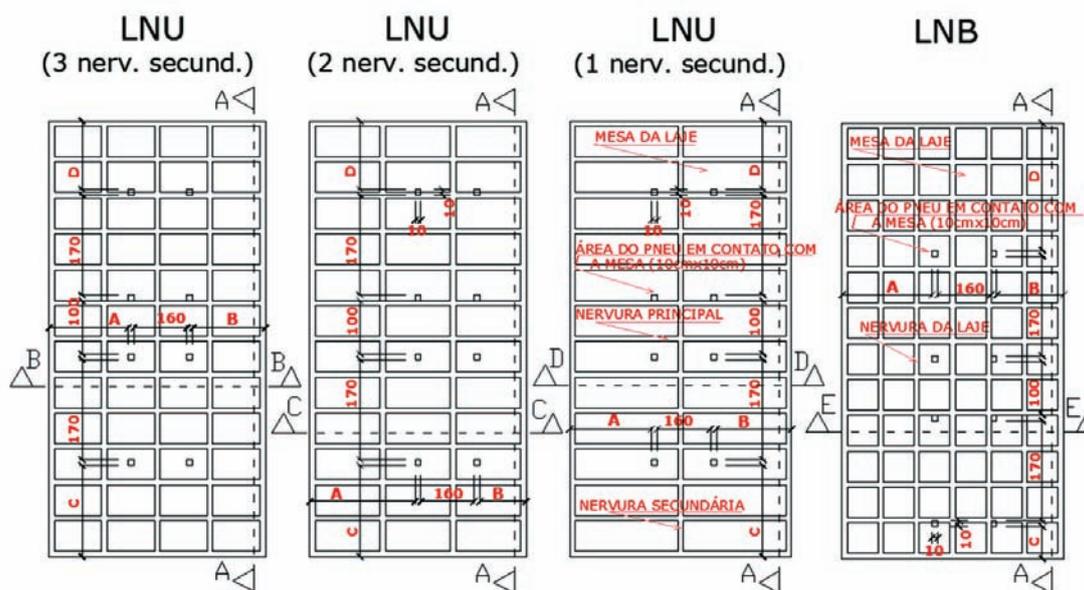


Figura 5 - Ilustração geométrica dos EUB e disposição das cargas concentradas (medidas em $10^{-2}m$)



[8]. Este pré-dimensionamento é realizado mediante o conhecimento prévio das outras dimensões da laje e do carregamento solicitante. Para estas simulações foi utilizado o programa ABAQUS, que além de ser amplamente conhecido no âmbito acadêmico, dispõe de uma grande variedade de elementos e de modelos de análise. Foi realizada uma análise de sensibilidade para definir o nível de refinamento de malha necessária para garantir resultados consistentes.

3.1 Descrição dos modelos

Após determinar a altura da laje na etapa de pré-dimensionamento, foi definido um conjunto de modelos combinando diferentes

valores de DNP, de QNS e de cargas acidentais. Foram tratados com exemplos de modelagem de lajes nervuradas unidirecional e bidirecional (EUB), fazendo as seguintes considerações:

- 1) os valores de DNP são constantes e podem ser tomados iguais a 0,50; 0,60; 0,65; 0,70; 0,80; 0,90 e 1,00 m;
- 2) as lajes nervuradas unidimensional (LNU) têm a distância entre nervuras principais (DNP) diferente da distância entre nervuras secundárias (DNS), sendo considerados modelos com 1, 2 e 3 nervuras secundárias;
- 3) nas lajes bidimensional (LNB), para cada DNP, define-se o QNS necessário para que a distância entre nervuras principais (DNP) seja igual a distância entre nervuras secundárias (DNS);

Figura 6 - Ilustração geométrica dos cortes dos EUB

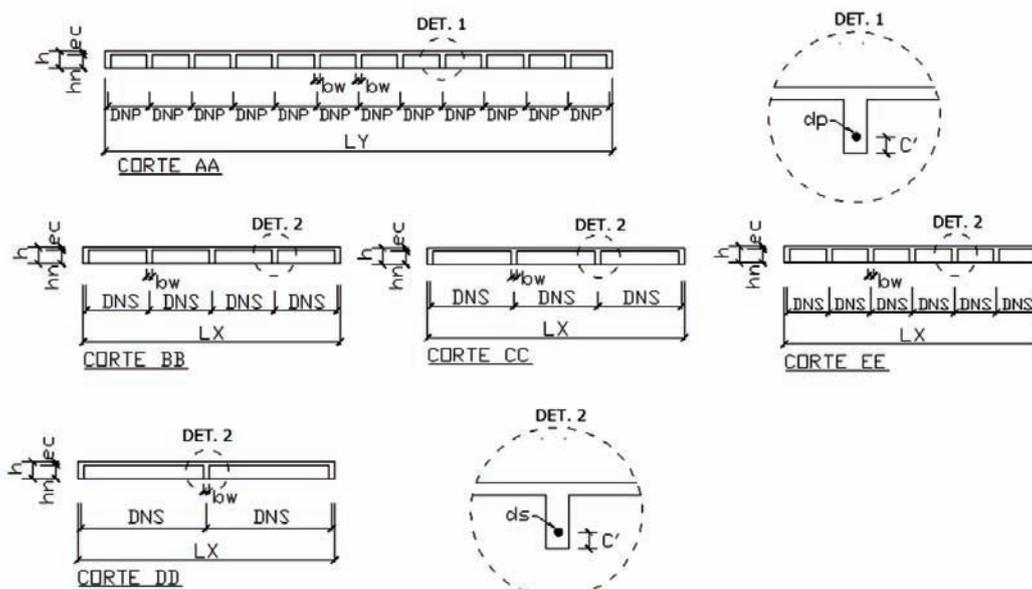


Tabela 1 - Dados geométricos das lajes idealizadas, todos os dados em m

| DNP | LY | A | B | C | D | bw | h | hn | ec | C' | ds | dp |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| 0,50 | 6,00 | 2,95 | 1,35 | 0,90 | 0,40 | 0,09 | 0,28 | 0,23 | 0,05 | 0,04 | 0,008 | 0,0176 |
| 0,60 | 6,00 | 2,95 | 1,35 | 0,85 | 0,45 | 0,09 | 0,28 | 0,23 | 0,05 | 0,04 | 0,008 | 0,0176 |
| 0,65 | 6,00 | 2,95 | 1,35 | 1,95 | 1,15 | 0,09 | 0,28 | 0,23 | 0,05 | 0,04 | 0,008 | 0,0176 |
| 0,70 | 6,00 | 2,95 | 1,35 | 0,80 | 0,50 | 0,09 | 0,28 | 0,23 | 0,05 | 0,04 | 0,008 | 0,0176 |
| 0,80 | 6,00 | 2,95 | 1,35 | 1,15 | 0,15 | 0,09 | 0,28 | 0,23 | 0,06 | 0,04 | 0,008 | 0,0176 |
| 0,90 | 6,00 | 2,95 | 1,35 | 0,70 | 0,60 | 0,09 | 0,28 | 0,23 | 0,06 | 0,04 | 0,008 | 0,0176 |
| 1,00 | 6,00 | 2,95 | 1,35 | 0,65 | 0,65 | 0,09 | 0,28 | 0,21 | 0,07 | 0,04 | 0,008 | 0,0176 |

Tabela 2 - Medidas geométricas e cargas dos veículos tipos

| Modelo dos veículos | Compacto | Sedan | Caminhonete | Veículos tipos |
|--------------------------------|----------|-------|-------------|----------------|
| Peso eixo dianteiro total (kN) | 9,00 | 12,80 | 16,75 | |
| Peso eixo traseiro total (kN) | 8,60 | 9,10 | 13,35 | |
| Peso em ordem de marcha (kN) | 13,00 | 17,10 | 20,10 | |
| Peso bruto total (kN) | 17,60 | 21,90 | 30,10 | |
| a (m) | 0,08 | 0,09 | 0,09 | |
| b (m) | 0,80 | 0,80 | 0,80 | |
| c (m) | 0,70 | 0,90 | 1,20 | |
| d (m) | 0,08 | 0,09 | 0,09 | |
| e (m) | 1,80 | 1,85 | 1,80 | |
| f (m) | 4,25 | 4,80 | 5,26 | |

4) as cargas aplicadas são o peso próprio e a carga accidental normativa. Desta forma, para cada modelo, considera-se, por um lado, o valor de carga distribuída recomendada na NBR 6120:1980 [1] e, por outro lado, as cargas concentradas correspondentes a três categorias de veículos utilizadas atualmente no mercado brasileiro.

As Figuras 5 e 6 apresentam detalhes das configurações consideradas e mostram o posicionamento dos pneus (pequenas áreas de 0,10 m x 0,10 m) onde são aplicadas as cargas concentradas.

Assim é possível combinar 7 DNP diferentes com 4 QNS para dois tipos de carregamentos e três tipos de veículos totalizando 54 situações de análise. A tabela 1 compila os dados geométricos dos diferentes modelos resultantes da combinação dos parâmetros definidos acima, sendo: h a altura da laje; hn a altura da nervura; ec a espessura da mesa; bw a largura da nervura; DNP a distância entre eixos das nervuras principais; DNS a distância entre eixos das nervuras secundárias; LX o menor lado da laje; LY o maior lado da laje; C' a distância do centro da armadura a base inferior da nervura; ds o diâmetro de armadura na nervura secundária; dp o diâmetro de armadura na nervura principal.

Tabela 3 - Valores das cargas transmitidas pelos pneus e usados nas simulações

| Modelo dos veículos | compacto | sedan | caminhonete |
|---------------------|----------|-------|-------------|
| Carga no pneu (kN) | 4,50 | 6,50 | 8,50 |

Tabela 4 - Características geométricas das lajes ensaiadas por Abdul-Wahab e Khalil (2000) (9)

| Laje | Vazios | α_1 (cm) | h_r (cm) | b_w (cm) | h (cm) | h/h_r | α_1/l |
|------|---------|-----------------|------------|------------|--------|---------|--------------|
| S1 | 11 X 11 | 13,6 | 2 | 5,2 | 9,5 | 4,8 | 0,091 |
| S2 | 9 X 9 | 16,7 | 2 | 5,2 | 9,5 | 4,8 | 0,111 |
| S3 | 7 X 7 | 21,4 | 2 | 5,2 | 9,5 | 4,8 | 0,143 |
| S4 | 5 X 5 | 30 | 2 | 5,2 | 9,5 | 4,8 | 0,2 |
| S5 | 9 X 9 | 16,7 | 2 | 5,2 | 12,5 | 6,3 | 0,111 |
| S6 | 9 X 9 | 16,7 | 2 | 4,7 | 6,5 | 3,3 | 0,111 |

Tabela 5 - Características das lajes ensaiadas por Abdul-Wahab e Khalil (2000) (9)

| Laje | f_{ck} (MPa) | E_{cs} (kN/cm ²) | G_c (kN/cm ²) | $P_{fissuração}$ (kN) | $P_{última}$ (kN) |
|------|----------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|
| S1 | 31,3 | 2663,05 | 399,46 | 30 | 105 |
| S2 | 32,0 | 2692,66 | 403,90 | 20 | 81 |
| S3 | 31,4 | 2667,30 | 400,10 | 20 | 65 |
| S4 | 28,9 | 2558,92 | 383,84 | 20 | 48 |
| S5 | 29,9 | 2602,81 | 390,42 | 40 | 120 |
| S6 | 29,1 | 2567,75 | 385,16 | 20 | 48 |

A carga distribuída aplicada nos modelos corresponde ao valor atualmente presente na NBR 6120:1980 [1], ou seja um valor de 3 kN/m². Para as cargas concentradas consideram-se os pesos de três tipos diferentes de veículos, os quais representam os modelos usuais do mercado brasileiro: o modelo compacto, o sedam e a caminhonete (utilitário). A Tabela 2 reúne informações da geometria e da carga dos automóveis utilizados.

Esses dados foram utilizados para posicionar o veículo sobre a laje e a intensidade das cargas, referente à solicitação veicular transmitida ao pavimento pelo contato do pneu com o piso. Na modelagem, para cada tipo, as cargas em cada pneu corresponde a metade do peso total do "eixo dianteiro" como indica a Tabela 3. Estes valores definem os valores e a posição dos carregamentos utilizados na análise. Os veículos são posicionados de forma a

Figura 7 - Geometria básica (medidas em cm, 10⁻²m) das lajes ensaiadas por Abdul-Wahab e Khalil (2000) (9)

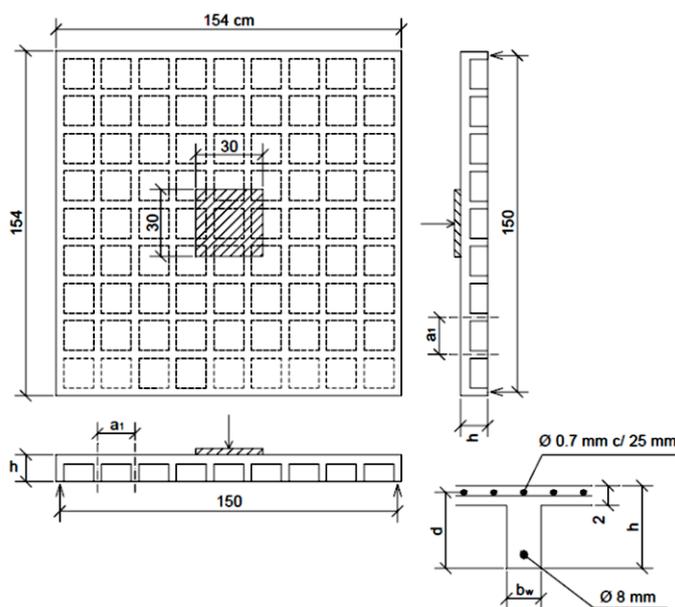
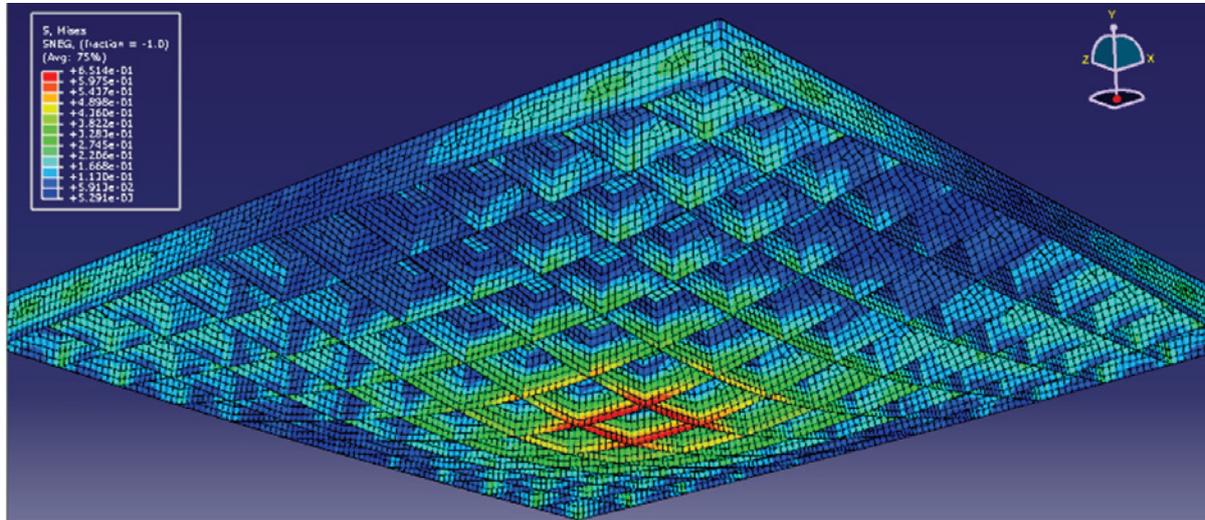


Tabela 6 - Deflexões das análises experimental e numérica

| Carga | Análise experimental | Análise numérica | | | | | | | |
|-------|----------------------|--------------------------|---------|---------|---------|----------------------------|---------|---------|---------|
| | | S4R (10 ⁻² m) | | | | C3D20 (10 ⁻² m) | | | |
| | (10 ⁻² m) | 10% | 20% | 30% | 40% | 10% | 20% | 30% | 40% |
| 10kN | -0,01 | -0,0255 | -0,0257 | -0,0258 | -0,0279 | -0,0145 | -0,0143 | -0,0141 | -0,0139 |
| 20kN | -0,03 | -0,0473 | -0,0475 | -0,0477 | -0,0516 | -0,0277 | -0,0273 | -0,0269 | -0,0265 |

Figura 8 – Distribuição das tensões (10^4 kN m^2) para o modelo numérico S4R - 10%



contemplar a situação mais desfavorável. Considerando o parâmetro de controle adotado, o posicionamento deve gerar as maiores deflexões.

3.2 Tipo de elemento e refinamento

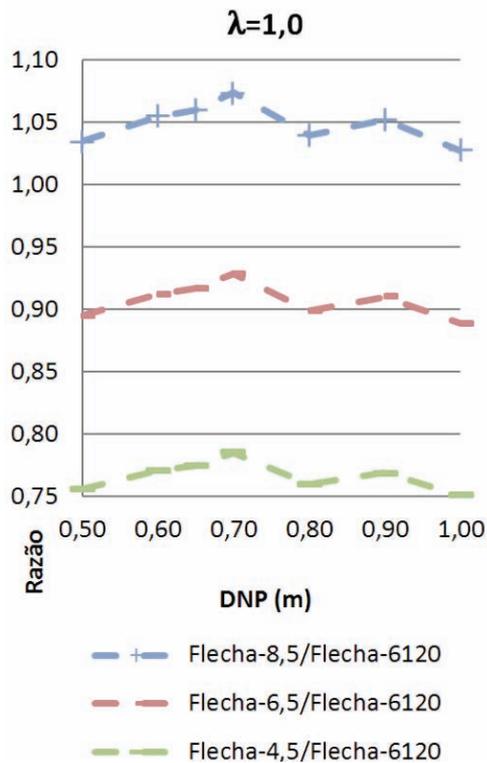
A definição do tipo de elemento e o refinamento tiveram a finalidade de encontrar boas respostas com o menor tempo de análise. Para tal, foram feitas modelagens numéricas, de um modelo experimental de uma das lajes nervuradas ensaiadas por Abdul-Wahab e Khalil (2000) [9]. As Tabelas 4 e 5 e a Figura 7 apresentam as características geométricas e as propriedades mecânicas dos modelos experimentais.

O modelo simulado numericamente foi o modelo experimental S1, que apresentou flechas maiores. Os valores de flechas do modelo experimental foram comparados com os do numérico. Foram utilizados nas simulações numéricas os valores de 10 kN e 20 kN que correspondem ainda a um comportamento linear, de acordo com os resultados experimentais apresentados pelos autores nos quais foi observado uma carga de fissuração de 30 kN, como indica a Tabela 5. Essas cargas foram aplicadas numa área centrada na laje, conforme ilustrado na Figura 7.

A Tabela 6 apresenta os valores de deflexões para os modelos numérico e experimental (modelo experimental S1). As simulações foram realizadas com elementos de superfície (modelo S4R de casca) e tridimensionais (modelo C3D20 de volume), seguindo a nomenclatura usual do ABAQUS. Para cada caso, adotaram-se malhas com quatro tamanhos de elementos: 1,36 cm (10% do vão), 2,72 cm (20% do vão), 4,08 cm (30% do vão) e 5,44 cm (40% do vão), sendo o vão definido como a distância entre eixo das nervuras.

Na Tabela 6 observa-se ainda que o tipo de modelo que apresenta resultados mais próximos do valor experimental é o de elemento tridimensional de tamanho igual a 10% do vão. Entretanto as deflexões correspondentes ao tamanho de 10% não são muito diferentes dos obtidos com o tamanho de 20% (menos de 2%). Assim sendo, admite-se que os valores das deflexões obtidos com o tamanho de 20% fornece uma precisão suficiente, pois o ganho com o tamanho de 10% é desprezível.

Figura 9 – Razão entre a flecha gerada pelos veículos em relação a distribuída recomendada pela norma para $\lambda = 1$



A Figura 8 mostra uma distribuição de tensões sem concentração, condizente com a carga aplicada, o que demonstra que o refinamento da malha está adequado.

Essa análise preliminar onde se procurou reproduzir, numericamente, os resultados experimentais de Abdul-Wahab e Khalil (2000) [9] permitiu definir os tipos de elementos finitos que podem ser utilizados assim como o nível de refinamento aceitável para resultados coerentes. Observa-se claramente que a consideração de elementos de casca mostra uma estrutura mais flexível. Na sequência, os mesmos parâmetros são utilizados para criar os modelos correspondentes as diferentes combinações mencionadas no item 3.1.

4. Resultados

Considerando os objetivos da análise, os resultados são explorados através da comparação das deflexões obtidas com as cargas distribuídas normativas e as obtidas com as cargas concentradas. Também são deduzidas as cargas distribuídas equivalentes aos pesos dos diferentes tipos de veículos. Devido ao grande número de combinações, define-se uma codificação XX-YY-DNP, onde XX se refere a uma deflexão ou a uma carga de veículo, YY representa o tipo de veículo e DNP a distância entre nervuras principais para a combinação considerada. De uma forma geral, vale a pena evidenciar a influência de cada parâmetro no comportamento das lajes.

Os resultados desta análise paramétrica podem ser apresentados na forma de curvas que mostram a relação entre deflexões geradas pelas cargas concentradas e as geradas pelas cargas distribuídas para diferentes valores dos outros parâmetros. Assim podem-se ter, para cada valor de λ (1; 1,5; 2) curvas relacionando as deflexões obtidas para cada categoria de veículos e as obtidas para a carga distribuída recomendada na norma (Figuras 9, 10,11). Essas curvas correspondem a um valor de DNS = 130 m. Nota-se que as curvas mostram uma mesma tendência.

Estas curvas ilustram a influência da geometria da laje sobre o valor da carga distribuída equivalente necessária. Por outro lado, pode ser considerada também a influência do tipo de veículo, confrontando, para cada categoria, as curvas obtidas para os diferentes valores de λ (figuras 13,14,15).

Observando as curvas, as relações de deflexões crescem em todos os casos para valores de DNP entre 0,50 e 0,70 m. Para valores maiores de DNP, a relação decai. Analisando as informações das curvas, tem-se para $\lambda = 2$ valores superiores a 1, o que indica que, para este valor de λ , a carga distribuída de 3,0 kN/m² é baixa. Precitaria ser maior para ser representativa. Entretanto, para $\lambda = 1,5$ a carga distribuída mostrou-se coerente com as cargas concentradas de 6,5 kN e 4,50 kN, mas a relação tem valor maior a unidade para a carga de 8,5 kN. Assim a carga de 3,0 kN/m² não serviria para representar a carga accidental para esta situação. Quando λ vale 1 todas as relações de deflexões se tornam

Figura 10 – Razão entre a flecha gerada pelos veículos em relação a distribuída recomendada pela norma para $\lambda = 1,5$

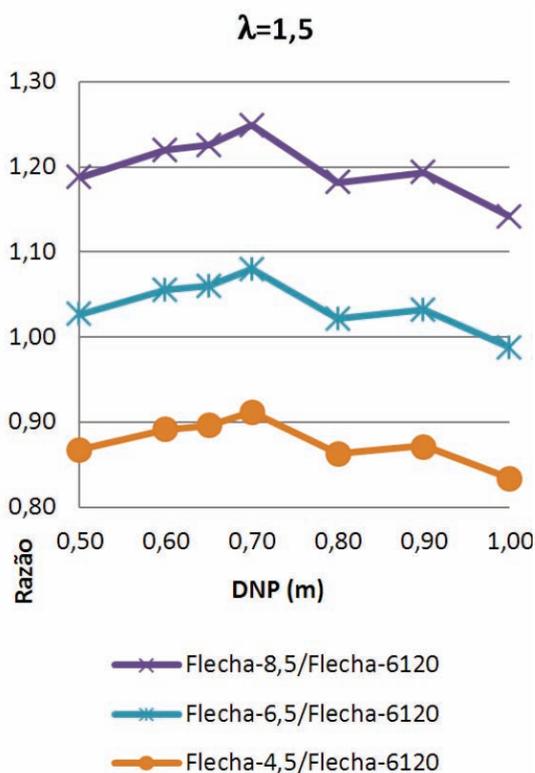
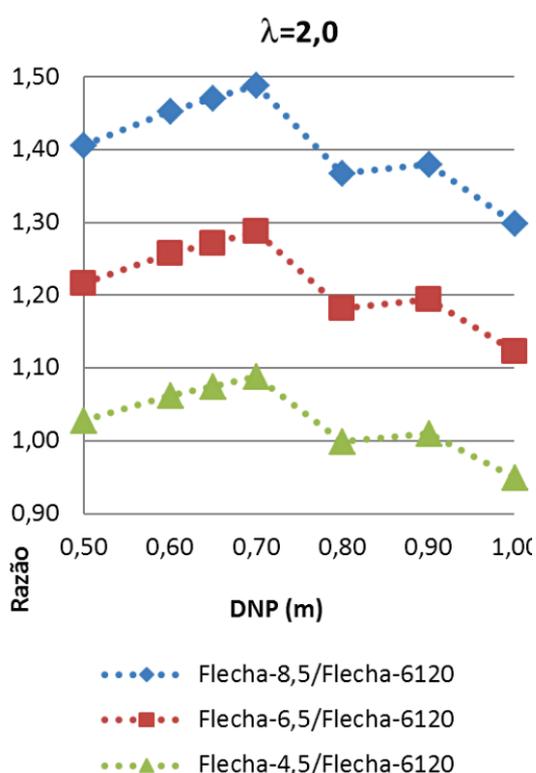


Figura 11 – Razão entre a flecha gerada pelos veículos em relação a distribuída recomendada pela norma para $\lambda = 2$



menores que 1, indicando que a carga da norma é representativa. A análise feita acima mostra que, para cargas mais elevadas (QC igual a 6,5 kN ou 8,5 kN) a carga distribuída recomendada pela norma não seria representativa da situação real da laje, e isso, para qualquer valor de λ ou qualquer distância entre nervuras principais (DNP). Sendo assim, considerou-se apropriado fazer uma correção nos valores da QD para que a mesma tivesse a mesma flecha observada com a aplicação de uma QC, Tabela 7. Nesta tabela q NUM (kN/m²), é a QD que provoca a mesma flecha que a QC de valor NUM (kN).

A Tabela 7 apresenta os valores corrigidos da QD para cada DNP, com λ variando de 1,0 a 2,0. Os valores corrigidos de QD mostram certa linearidade em relação a variação de λ como mostra a figura 15 onde q-NUM1_NUM2 (kN/m²) é a QD que provoca a mesma flecha que a QC de valor NUM1 (kN) no modelo com a DNP de valor NUM2 (m).

Entretanto cabe duas observações importantes para essa faixa de valores de λ . Primeiro, analisando a variação para um determinado tipo de veículo e os diferentes valores de DNP (figura 16), observa-se que, para uma mesma geometria de laje, ou seja mesmo λ , a taxa de correção depende do valor de DNP.

Por ou lado, extraindo as curvas correspondentes a uma mesma DNP, de 0,70 m, por exemplo, observa-se que as retas de variação das cargas distribuídas corrigidas são paralelas, indicando que, para um mesmo valor de DNP a taxa de correção independe da carga (Figura 17). Todos os resultados apresentados até aqui advêm de simulações realizadas com um único valor de vão principal da laje (LY = 6m). Para completar a análise dos valores corrigidos de cargas distribuídas, modelos adicionais foram criados para verificar uma eventual dependência em relação ao comprimento dos vãos, ou seja, modelos com dimensões diferentes mas que mantém a mesma relação de lado λ .

Inicialmente, analisa-se a situação onde se varia o comprimento do vão principal LY de 4 a 12m mantendo $\lambda = 2$. A análise considera uma DNP de 0,80 m e uma QC de 8,5 kN (veículo caminhonete). Os valores corrigidos de QD correspondentes a estes modelos estão representados na figura 18 onde pode ser observada a tendência de variação em função de LY, sendo esta facilmente ajustada por uma função polinomial.

Em uma segunda etapa, verificou-se a tendência da taxa de variação dos valores corrigidos de QD considerando diferentes valores de λ para cada LY analisado. A figura 19 apresenta os resultados

Figura 12 – Razão entre a flecha gerada pela carga distribuída corrigida para o modelo compacto (q = 4,5 kN) em relação a carga distribuída recomendada pela norma para $\lambda = 1, 1,5$ e 2

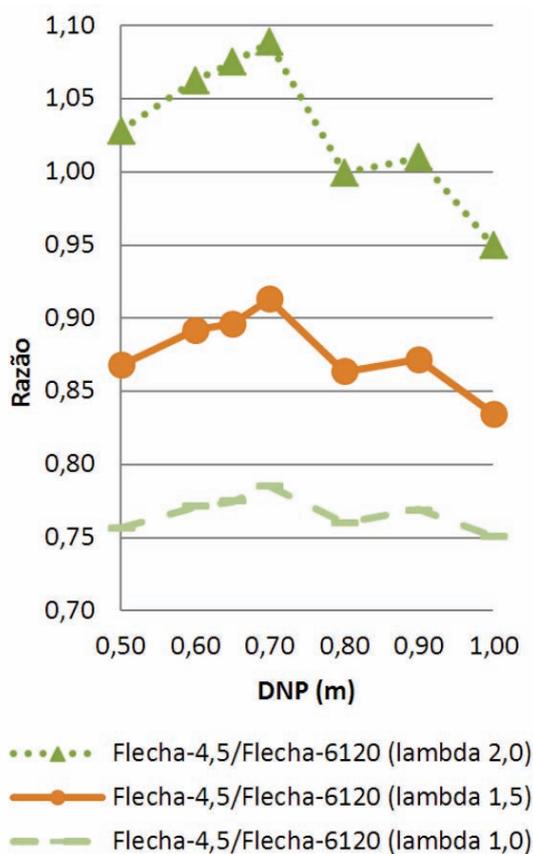


Figura 13 – Razão entre a flecha gerada pela carga distribuída corrigida para o modelo sedam (q = 6,5 kN) em relação a carga distribuída recomendada pela norma para $\lambda = 1, 1,5$ e 2

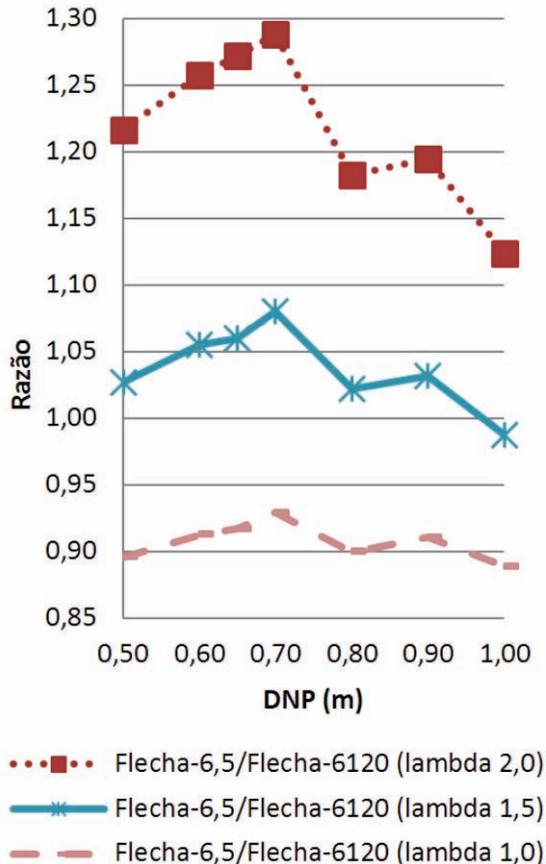


Figura 14 – Razão entre a flecha gerada pela carga distribuída corrigida para o modelo caminhonete (q = 8,5 kN) em relação a carga distribuída recomendada pela norma para λ = 1, 1,5 e 2

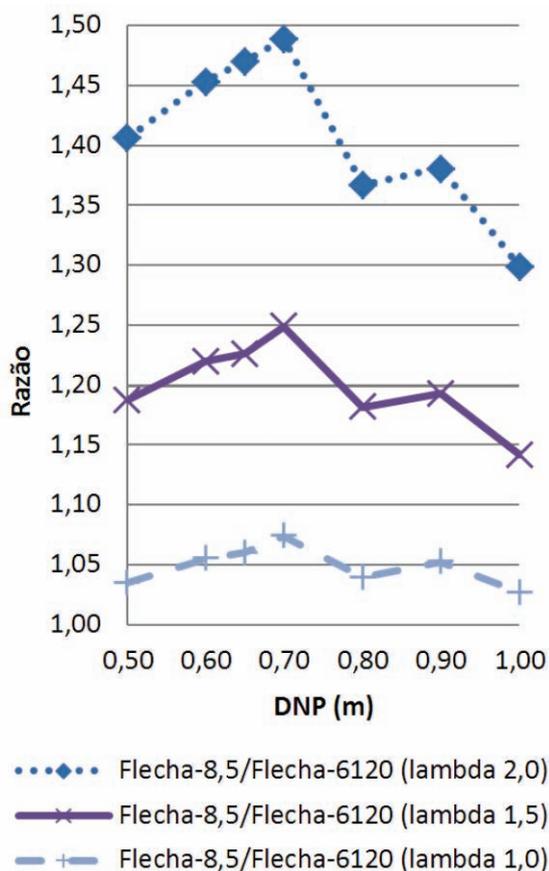


Figura 15 – Valores corrigidos das cargas distribuídas, para λ = 1, 1,5 e 2,0

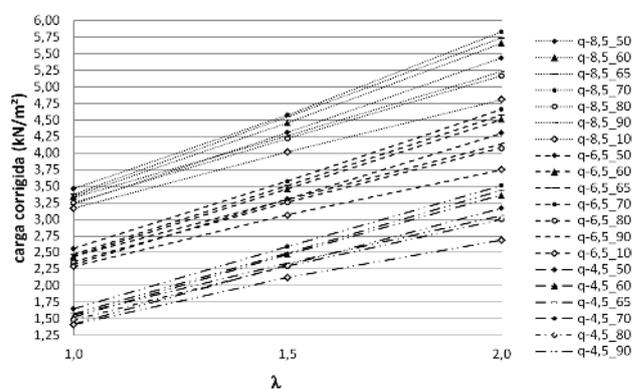
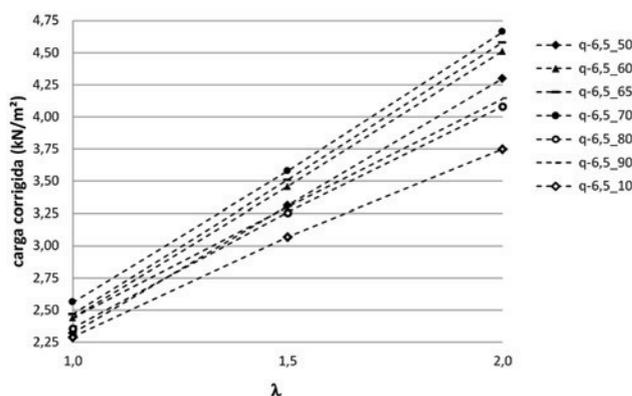


Figura 16 – Valores corrigidos para q = 6,5 kN



correspondentes. Como foi observado na análise com LY constante, a taxa de correção da QD cresce com o valor de λ, mostrando quase a mesma tendência para todos os valores de LY considerados. É importante observar que para valores de λ maior que 2, a taxa de correção não pode ser mais considerada linear.

Compilando na Tabela 8 os valores dessa análise para as três categorias de veículos, percebe-se a influência da geometria da laje, definida aqui pelo valor de λ. Os valores corrigidos da carga distribuída tendem a diminuir com o aumento de λ.

Tabela 7 – Valores corrigidos das cargas distribuídas, para o λ valendo 1,0, 1,5 e 2,0

| DNP (m) | 0,50 | 0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 1,00 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| q-8,5 (kN/m²) para λ = 1,0 | 3,23 | 3,35 | 3,38 | 3,46 | 3,25 | 3,33 | 3,17 |
| q-8,5 (kN /m²) para λ = 1,5 | 4,31 | 4,46 | 4,55 | 4,58 | 4,22 | 4,26 | 4,02 |
| q-8,5 (kN /m²) para λ = 2,0 | 5,44 | 5,66 | 5,74 | 5,83 | 5,17 | 5,23 | 4,81 |
| q-6,5 kN /m²) para λ = 1,0 | 2,32 | 2,44 | 2,47 | 2,56 | 2,36 | 2,44 | 2,29 |
| q-6,5 (kN /m²) para λ = 1,5 | 3,31 | 3,46 | 3,51 | 3,58 | 3,26 | 3,30 | 3,07 |
| q-6,5 (kN /m²) para λ = 2,0 | 4,30 | 4,51 | 4,58 | 4,66 | 4,08 | 4,14 | 3,75 |
| q-4,5 (kN /m²) para λ = 1,0 | 1,42 | 1,52 | 1,57 | 1,65 | 1,48 | 1,56 | 1,41 |
| q-4,5 (kN /m²) para λ = 1,5 | 2,31 | 2,47 | 2,49 | 2,59 | 2,30 | 2,34 | 2,12 |
| q-4,5 (kN /m²) para λ = 2,0 | 3,17 | 3,37 | 3,44 | 3,51 | 3,00 | 3,06 | 2,69 |

Figura 17 – Valores corrigidos para DNP = 0,70 m

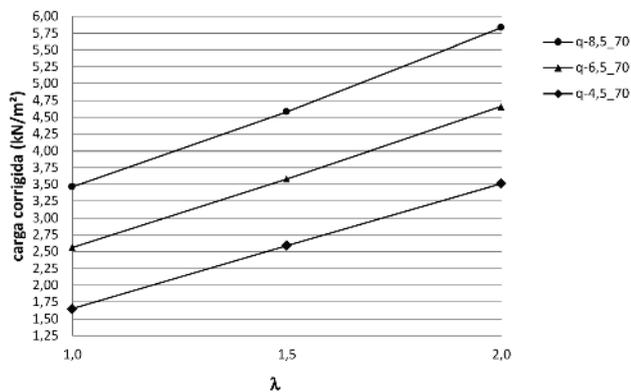
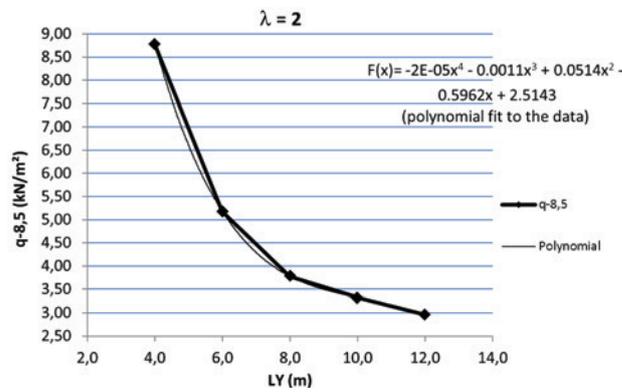


Figura 18 – Carregamento distribuído (q-8,5) para os vãos de 4m a 12m e λ = 2.0



5. Considerações finais

Sobre os valores dos QD (carga distribuída) corrigidos, definidos nas análises das flechas, eles foram considerando que a carga veicular atuante no pavimento fosse de um único tipo, ou seja, apenas de carros com cargas máximas limitadas por roda de até 4,5 kN, ou 6,5 kN, ou 8,5 kN, mas não foi considerada a atuação deles em conjunto, que é o considerado normal em pavimentos de garagem, onde se estacionam todos os modelos de veículos, sem distinguir locais de estacionamento específico para cada modelo.

Segundo o Departamento Nacional de Trânsito, o DENATRAN, a frota brasileira de veículos do tipo compacto, sedam e caminhonete é de aproximadamente 42 milhões, sendo que destes, 10% são de caminhonetes e os outros 90% estão associados aos veículos com suporte de até nove passageiros incluindo o motorista, que são exatamente os veículos mencionados neste trabalho como sedam e compacto. Tomando isso como premissa, podemos afirmar que é muito baixa a probabilidade de, em um pavimento de garagem, uma determinada laje venha a ter

apenas veículos do tipo caminhonete estacionados, e gerando as situações mais desfavoráveis para a estrutura.

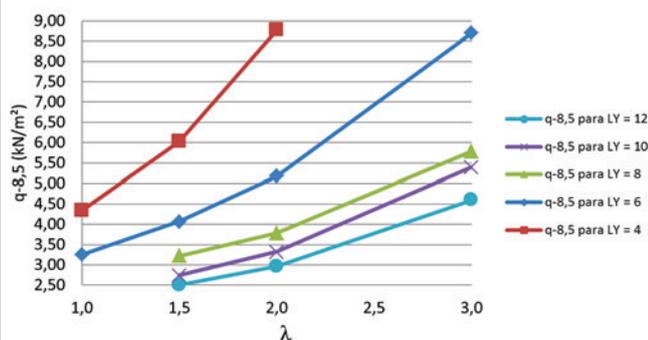
Assim sendo, este estudo considera que seria recomendável, para uso de forma geral nos pavimentos de garagem, o valor de carregamento acidental distribuído corrigido, associado aos veículos de carga máxima de 6,5 kN por roda, ou seja, q-6,5. Essa carga de 6,5 kN por roda é também representativa para as caminhonetes na medida em que as mesmas não estão totalmente carregadas, ou seja, estão apenas com passageiros. A Tabela 10 apresenta os valores de QD corrigidos (q-c), associados apenas ao carregamento concentrado (QC) de 6,5 kN. Os valores mostram duas tendências de variação: uma inversamente proporcional à variação de LX e, a outra no mesmo sentido que λ, o que indica que a utilização dos valores da Tabela 10, em projetos estruturais é condicionada à geometria da laje conforme os valores de λ e de LX.

Um valor razoável de carga distribuída a ser utilizado em pavimentos de garagem, para o contexto atual, seria 4,0 kN/m². Para lajes com LX menor que 4 m, os valores devem ser majorados com um $\varnothing = 1,15 * (LX/10)$, onde $10 = 4$.

Tabela 8 – Valores corrigidos dos QD para λ valendo 1,0, 1,5, 2,0 e 3,0 com o LY constante

| LX (m) | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------|-------|------|------|------|------|
| q-8,50 (kN/m²) (λ = 1,0) | 11,43 | 8,37 | 4,34 | 3,74 | 3,46 |
| q-8,50 (kN/m²) (λ = 1,5) | 10,14 | 6,43 | 4,58 | 3,18 | 2,51 |
| q-8,50 (kN/m²) (λ = 2,0) | 8,78 | 5,83 | 3,78 | 3,32 | 2,96 |
| q-8,50 (kN/m²) (λ = 3,0) | 9,85 | 5,92 | 4,43 | 3,21 | 2,66 |
| q-6,50 (kN/m²) (λ = 1,0) | 8,44 | 6,18 | 4,55 | 3,40 | 2,56 |
| q-6,50 (kN/m²) (λ = 1,5) | 7,93 | 5,03 | 3,58 | 2,49 | 1,96 |
| q-6,50 (kN/m²) (λ = 2,0) | 7,03 | 4,66 | 3,03 | 2,66 | 2,37 |
| q-6,50 (kN/m²) (λ = 3,0) | 8,13 | 5,57 | 3,70 | 2,68 | 2,22 |
| q-4,50 (kN/m²) (λ = 1,0) | 5,46 | 4,00 | 2,95 | 2,20 | 1,65 |
| q-4,50 (kN/m²) (λ = 1,5) | 5,74 | 3,64 | 2,59 | 1,80 | 1,42 |
| q-4,50 (kN/m²) (λ = 2,0) | 6,61 | 3,51 | 2,85 | 2,50 | 2,23 |
| q-4,50 (kN/m²) (λ = 3,0) | 6,47 | 4,79 | 3,98 | 3,52 | 2,92 |

Figura 19 – Carregamento distribuído (q-8,5) para os vãos de 4m a 12m e λ de 1.0 a 3.0



6. Referências bibliográficas

- [01] Associação Brasileira de Normas Técnicas (1980). *Cargas para o cálculo de estruturas de edificações: NBR 6120:1980*. Rio de Janeiro.
- [02] European Standard (2002). *Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-1: General actions — Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. Eurocode 1.
- [03] *International Building Code*. IBC (2009). 2009
- [04] Silva, M. A. (2005). *Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado*. Dissertação de Mestrado em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- [05] Dantas, M. F. C. and Nascimento, S. C. S. (2009). *Análise Comparativa entre Sistemas Estruturais Convencionais e Estruturas de Lajes Nervuradas em Edifícios*. Salvador. Universidade Católica do Salvador.
- [06] Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *Projeto de estruturas de concreto: NBR 6118:2007*. Rio de Janeiro.
- [07] Tenório, D. A.; Gomes, P. C. C.; Barboza, A. S. R.; Uchôa, E. L. M. (2009). *Aspectos Técnicos Econômicos de Lajes Nervuradas Unidirecionais e Bidirecionais*. Congresso

Brasileiro do Concreto 51, Curitiba, Outubro.

- [08] Tenório, D. A. Contribuição à análise de lajes nervuradas em pavimentos de garagem. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas, Universidade Federal de Alagoas, 2011. Pg 117.
- [09] Abdul-Wahab, H. M. and Khalil, M. H. (2000). *Rigidity and Strength of Orthotropic Reinforced Concrete Waffle Slabs*. Journal of Structural Engineering.

Tabela 9 – Valores corrigidos dos CACD (q-c), para λ de 1,0, 1,5, 2,0 e 3,0

| MRS (m) | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------------------------|-------|------|------|------|------|
| q-8,50 (kN/m²) ($\lambda = 1,0$) | 11,43 | 8,37 | 4,34 | 3,74 | 3,46 |
| q-8,50 (kN/m²) ($\lambda = 1,5$) | 10,14 | 6,43 | 4,58 | 3,18 | 2,51 |
| q-8,50 (kN/m²) ($\lambda = 2,0$) | 8,78 | 5,83 | 3,78 | 3,32 | 2,96 |
| q-8,50 (kN/m²) ($\lambda = 3,0$) | 9,85 | 5,92 | 4,43 | 3,21 | 2,66 |
| q-6,50 (kN/m²) ($\lambda = 1,0$) | 8,44 | 6,18 | 4,55 | 3,40 | 2,56 |
| q-6,50 (kN/m²) ($\lambda = 1,5$) | 7,93 | 5,03 | 3,58 | 2,49 | 1,96 |
| q-6,50 (kN/m²) ($\lambda = 2,0$) | 7,03 | 4,66 | 3,03 | 2,66 | 2,37 |
| q-6,50 (kN/m²) ($\lambda = 3,0$) | 8,13 | 5,57 | 3,70 | 2,68 | 2,22 |
| q-4,50 (kN/m²) ($\lambda = 1,0$) | 5,46 | 4,00 | 2,95 | 2,20 | 1,65 |
| q-4,50 (kN/m²) ($\lambda = 1,5$) | 5,74 | 3,64 | 2,59 | 1,80 | 1,42 |
| q-4,50 (kN/m²) ($\lambda = 2,0$) | 6,61 | 3,51 | 2,85 | 2,50 | 2,23 |
| q-4,50 (kN/m²) ($\lambda = 3,0$) | 6,47 | 4,79 | 3,98 | 3,52 | 2,92 |