



Estudo do comportamento de lajes alveolares protendidas

Behavior study of prestressed hollow core slabs

Felipe Loyola Tessari (1); Lorenzo Augusto Ruschi e Luchi (2)

(1) Mestrando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo
e-mail: loyola_felipe@hotmail.com; (P) Apresentador

(2) Dr. Prof., Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo
e-mail: lorenzo@rl.eng.br

Resumo

Este artigo discute o comportamento estrutural de lajes alveolares protendidas comumente usadas no Brasil. Neste estudo numérico variou-se as dimensões da laje bem como a protensão aplicada nas peças. Buscando estudar, compreender e aperfeiçoar o uso destas lajes, foram realizadas modelagens por meio de uma análise numérica via elementos finitos utilizando o programa computacional ANSYS para reproduzir ensaios com modelos físicos já realizados e assim comparar os resultados numéricos aos experimentais, a fim de calibrar o uso deste modelo numérico para o estudo paramétrico destas lajes. Os resultados numéricos alcançados mostram quão conservadora é a formulação disponível na norma ABNT NBR 14861:2011. Além disso, pretende-se fornecer subsídios para a avaliação desses elementos, considerando as características específicas das lajes produzidas no Brasil.

Palavra-Chave: lajes alveolares protendidas, falha por cisalhamento, investigação numérica

Abstract

This paper studies the structural behavior of prestressed hollow core slabs, commonly used in Brazil. The dimensions of slabs were varied, as well as pretension applied in the pieces. In order to study, understand and improve the use of these slabs, was developed a numerical model using FEM ANSYS software, comparing with results of physical tests, in order to calibrate the use of this numerical model for the parametric study of these slabs. Numerical results shows that Brazilian Code is conservative. In addition, it is intended to provide subsidies for the evaluation of these elements, considering the specific characteristics of slabs produced in Brazil.

Keywords: prestressed hollow core slabs, shear failure, numerical investigation

1 Introdução

No contexto da pré-fabricação em concreto, as lajes ou painéis alveolares protendidos tem ganhado cada vez mais importância e competitividade sendo utilizadas em diversas tipologias construtivas, não apenas em estruturas de concreto, mas também em sistemas mistos. Marquesi (2014) ressalta que os pavimentos em lajes alveolares conseguem minimizar o consumo de concreto e maximizar os vãos, convergindo para uma solução econômica, como pode ser observado na figura 1. Isso se dá pelo efeito da protensão associada a uma seção transversal estruturalmente eficiente. Além disso, a facilidade de fabricação e montagem, originada na pré-fabricação, proporciona uma vantagem significativa na economia do tempo quando comparado as estruturas moldadas in loco. Além de não demandar tempo de cura, a estrutura uma vez montada, se torna uma plataforma para outras etapas da obra serem cumpridas.

Quanto mais aproximarmos o dimensionamento teórico ao funcionamento real das lajes alveolares, mais econômicas se tornarão as estruturas com este tipo de laje. Desta maneira elas poderão cada vez mais ser utilizadas para diversas aplicações e também para habitações econômicas.

As lajes alveolares são constituídas por painéis de concreto, na sua maioria protendidos, que possuem seção transversal de altura constante e alvéolos longitudinais (vazios na estrutura), os quais tem a finalidade principal de reduzir o peso próprio e diminuir a quantidade de concreto, em comparação com lajes maciças de mesma altura. Comparado com uma laje maciça, a laje alveolar pesa entre 30% a 50% a menos.

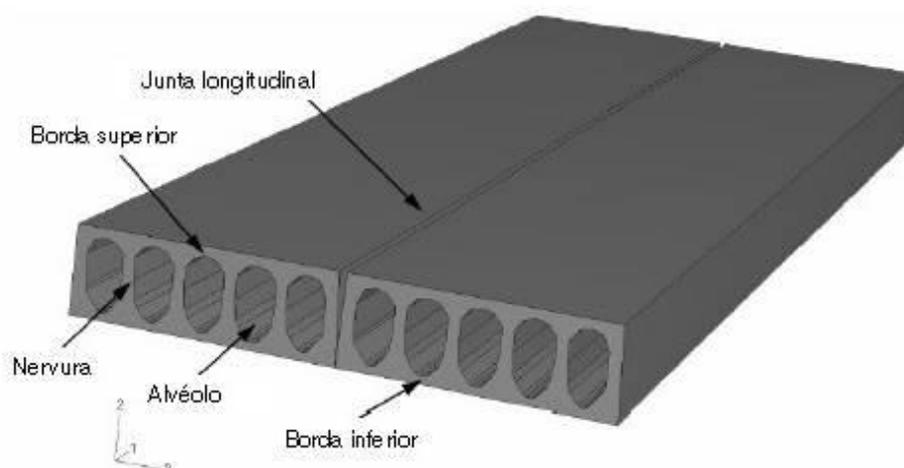


Figura 1 – Unidade alveolar. (Rettne & Edekling, 2006)

Os principais parâmetros de projeto são: o grau de protensão, o tipo de cordoalha e a espessura dos elementos. Geralmente as lajes protendidas são utilizadas para vencer vãos que variam de 3 m a 15 m e possuem altura de 15 cm a 30 cm, podendo atingir até 50 cm.

2 Processo produtivo e normatização

As lajes alveolares geralmente são produzidas em pistas com comprimentos de 100m, podendo ser recortada no comprimento desejado de projeto. Existem dois métodos básicos de produção de lajes alveolares: fabricação por extrusão ou por fôrma deslizante.

Na fabricação por extrusão, o concreto, com baixo abatimento, é empurrado pela pista pela máquina conforme figura 2 abaixo. Os alvéolos são formados pela compactação do concreto por tubos helicoidais. Nesse procedimento há apenas um estágio de lançamento e compactação do concreto.



Figura 2 – Máquina extrusora. (Costa, 2009)

De acordo com a ABNT 14861 (NBR, 2011), a verificação à força cortante deve ser feita na seção transversal mais crítica ao longo do vão do elemento, a partir da distância de 0,5 vezes a altura da laje da extremidade do seu apoio.

A resistência V_{Rd1} à força cortante de lajes alveolares com ou sem capeamento estrutural deve ser calculada segundo a expressão:

$$V_{Rd1} = V_{c,1} + V_{p,1} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo

$$V_{c,1} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \rho_1) \cdot \sum b_{w,1} \cdot d \quad (\text{Equação 2})$$

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \sum b_{w,1} \cdot d \quad (\text{Equação 3})$$

Onde V_{Rd1} é a força cortante resistente de cálculo na seção, com ou sem capa estrutural; f_{ctd} é a resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado; $\sum b_{w,1}$ é o somatório das nervuras (internas e externas) da laje alveolar; A_s é a área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada; ρ_1 corresponde à taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada; d é a altura útil total da seção transversal, $\sigma_{cp,1}$ é a tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto; N_p é a força de protensão final, depois de todas as perdas; e por fim A_c , que representa a área da seção transversal de concreto da laje alveolar pré-moldada;

No Brasil um dos primeiros estudos relacionados a lajes alveolares foi o de Fernandes (2007), realizado no Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto-NETPRE, propondo procedimentos para ensaios com o uso de normas europeias.

Esse artigo visa estabelecer uma análise numérica, a partir dos estudos de Catoia (2011), que avaliou o comportamento de lajes alveolares de uso corrente no Brasil, painéis com altura até 200mm protendidos. Foram realizados 96 ensaios, sendo 31 de flexão e 65 de força cortante, exemplificado na figura 3 abaixo.



Figura 3 – Posicionamento da viga de transferência de força no ensaio. (Catoia, 2011)

3 Análise numérica e calibração

Na etapa de modelagem no ANSYS, as lajes que serão utilizadas como balizador e calibrador serão as lajes do lote Z, sem capeamento estrutural, visto a grande utilização no mercado brasileiro e principalmente o esforço computacional, já que se trata de uma laje com 3,1m de comprimento, gerando um número menor de elementos para criação da malha e posterior análise não linear. Para validação do modelo a ser desenvolvido, os seus resultados de resistência ao cisalhamento última e curvas de Força x Deslocamento serão comparados com exemplos experimentais presentes na literatura de Catoia (2011) e os teóricos calculados de acordo com as normas vigentes. A seguir serão apresentados aspectos gerais da estratégia de modelagem desenvolvida.

O modelo experimental consiste em uma laje alveolar de 1,25m de largura e 3,10m de comprimento, contendo 6 alvéolos, 5 cordoalhas de protensão de 12,7mm CP190RB e carregamento a 2,5 vezes a altura da seção a partir do apoio até se ter a não-convergência da análise não linear aplicada. O elemento solid65, esquematizado na figura 4, foi utilizado na discretização da laje alveolar de concreto. A opção por um elemento sólido se deve ao fato do presente trabalho ter também como objetivo simular efeitos localizados, como a concentração de tensões e fissuras junto aos apoios, cordoalhas e carregamentos. Além disso, a utilização de um elemento sólido possibilitaria, em trabalhos futuros, uma análise no campo térmico da mesma, no que se refere ao estudo de lajes alveolares protendidas em situação de incêndio.

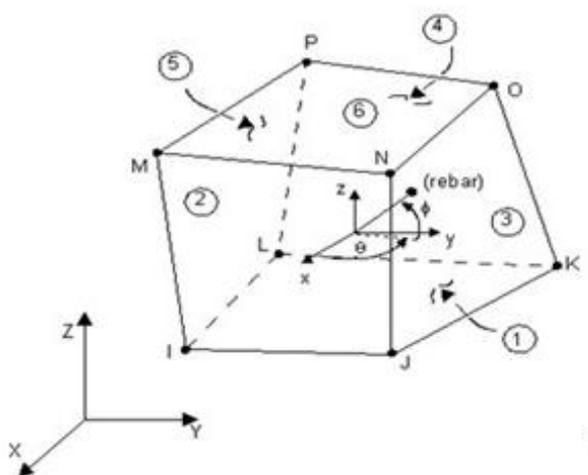


Figura 4 – Elemento finito solid65. (ANSYS)

O elemento link180 foi utilizado neste artigo para elaboração das cordoalhas de pré-tração do modelo, o elemento pode ser usado para modelar cabos tracionados, barras comprimidas, molas, entre outros elementos uniaxiais que não possuem rotações. O link180 permite uma alteração na área da seção transversal em função do alongamento axial. Por padrão, a área da seção transversal muda de modo que o volume do elemento seja preservado, mesmo após a deformação.

Como o objetivo deste artigo é a análise dos resultados (cisalhamento último, deformação e deslocamentos) na região de carregamento dos modelos, foram introduzidos apoios batoques, através dos elementos solid185, conforme figura 5; com isso, o processamento não foi interrompido devido as tensões localizadas nesta região. Como condições de contorno, temos na região central dos apoios, restrições verticais (eixo y) ao longo das chapas de apoio e longitudinais (eixo x) na linha de centro da chapa mais próxima ao carregamento. Por fim é permitido a translação (eixo z) em qualquer seção da laje alveolar protendida salvo em um elemento na borda da chapa distante do carregamento para não ocasionar problemas computacionais, simulando dessa forma o apoio em perfil I sobre madeira (apoio do segundo gênero), utilizados nos ensaios experimentais.

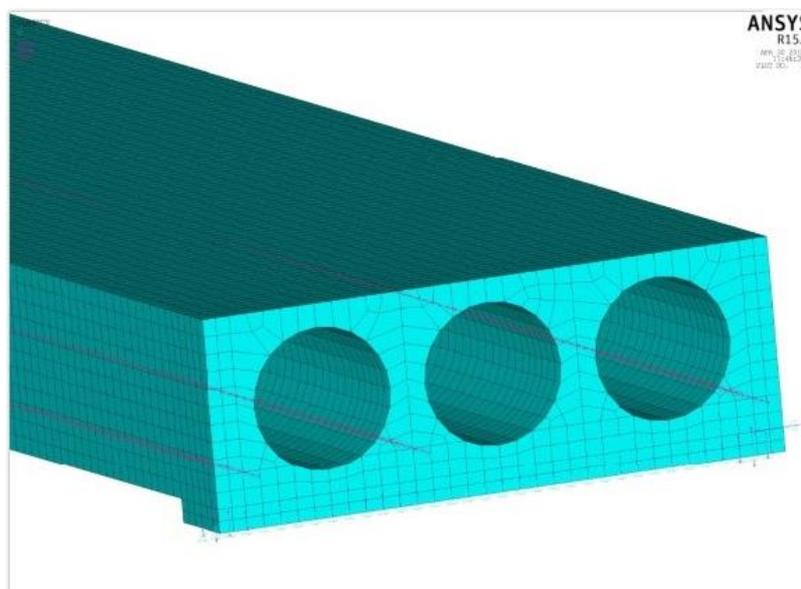


Figura 5 - Condições de contorno. (Autor)

Os ensaios experimentais foram realizados considerando a aplicação de deslocamento na parte superior da laje, a uma distância de 2,5 vezes a altura da seção a partir do apoio; na simulação numérica a aplicação da carga ocorreu diretamente nos nós da parte superior da chapa de transmissão, por meio de incrementos previamente definidos (1000 passos), de modo que o modelo reproduza o ensaio experimental.

A simulação numérica foi dividida em duas etapas. Na primeira, foi considerado apenas o peso próprio da estrutura e a aplicação da protensão na fábrica, definindo para tanto um valor para o peso específico de cada material impondo uma ação gravitacional e aplicando uma força nas extremidades das lajes ensaiadas correspondentes as forças aplicadas nos ensaios experimentais. A força total aplicada no ensaio foi dividida por todos os nós dos elementos nas cordoalhas, atribuindo três direcionamentos para essa operação, carga zerada no centro, crescimento linear dos valores e por fim, que o somatório de todas as cargas seja igual a força de protensão aplicada, observado na figura 6.

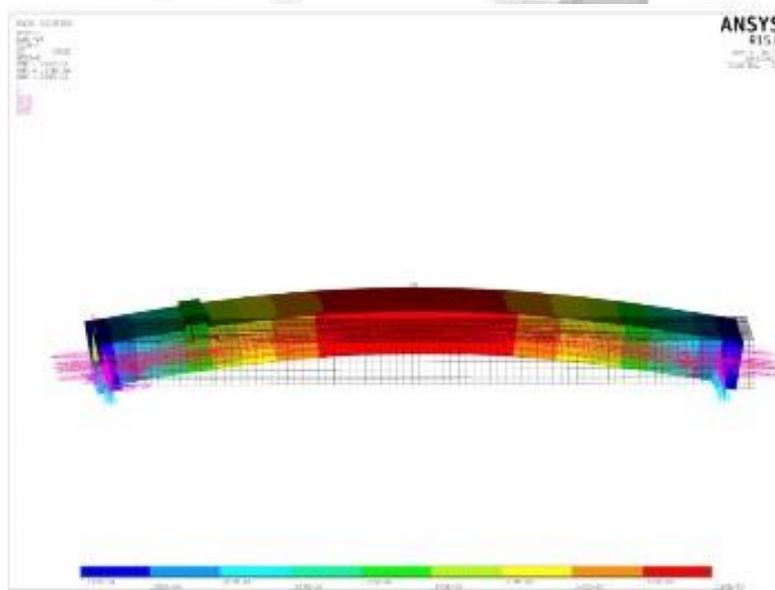


Figura 6 - Contra flecha após aplicação da protensão no TIME 1. (Autor)

Na segunda etapa foi aplicado um deslocamento, linearmente distribuído na seção a uma distância de 2,5 vezes a altura da seção a partir do apoio. Em ambos os casos a carga foi aplicada por meio de forças nos nós da face superior da laje de concreto ou aplicada sobre batoques metálicos. Vale salientar que, devido à não linearidade considerada para os materiais que constituem a laje alveolar, a aplicação tanto do peso próprio e protensão quanto do carregamento externo foi realizada de forma incremental. Abaixo, na figura 7 temos fotos dos ensaios de cisalhamento de Catoia (2011) mostrando o esquema de aplicação de carga.

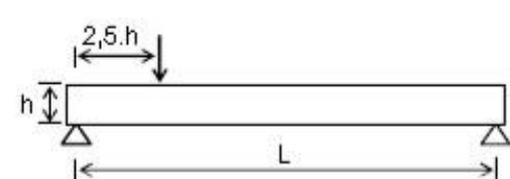
Esquema de ensaio	Laje empregada	h (cm)
	L1- S-15-6D9,5-X_C	15
	L2-S-20-8D12,7-X_C	20
	L3-S-20-6D12,7-V_C a	
	L5-S-20-6D12,7-V_C	
	L6-S-20-7D9,5-V_C a	
	L7-S-20-7D9,5-V_C	
	L12-S-20-5D12,7-Z_C a	
	L16-S-20-5D12,7-Z_G	
	L17-S-20-5D12,7-Z_G	
	L18-S-21-7D9,5-W_C	16
	L25-S-16-5D9,5-W_C a	
	L26-S-16-5D9,5-W_C	
	L28-S-26-9D12,7-W_C	
	L29-S-26-9D12,7-W_C	

Figura 7 – Esquema do ensaio de cisalhamento – ensaios L12 a L16 lote. (Catoia, 2011)

A relação constitutiva utilizada para o aço dos cabos segue o critério de Von Mises, sendo representada por meio da curva tensão-deformação, com base em um modelo elasto-plástico bi linear. O aço utilizado é o CP190RB com cordoalhas de 12,7mm, área de 1cm², coeficiente de poisson de 0,3 e módulo de elasticidade 200GPa. Abaixo na tabela 1, temos as propriedades do concreto utilizadas no modelo.



Tabela 1 – Propriedades do concreto utilizadas no modelo

PROPRIEDADES CONCRETO	
Peso específico (kN/m ³)	25
f _{ck} (MPa)	40
E _c (GPa)	29,2
Resistência à tração na liberação da protensão (MPa)	4,09

Visando representar o comportamento do concreto no modelo utilizou-se um critério de resistência composto, unindo ruptura frágil na tração e plastificação na compressão. No referente à tração, por meio do modelo concrete disponibilizado pelo ANSYS com base em Willan Warnke (ruptura frágil à tração) será possível simular a fissuração do concreto quando submetido a tensões de tração. Os parâmetros utilizados no modelo são apresentados na tabela 2. Com base em Kotinda (2006), foram adotados para os dois primeiros parâmetros da tabela os valores 0,2 e 0,6 respectivamente. Os últimos cinco parâmetros foram omitidos, permitindo ao ANSYS adotar valores pré-estabelecidos para os mesmos. A resposta do concreto à compressão disponibilizada pelo modelo concrete foi desabilitada, estipulando-se para tanto neste modelo f_c igual a -1. Admitiu-se, nesse caso, o critério de plastificação de Von Mises para o concreto sob compressão.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados modelo concrete

DESCRIÇÃO DE PARÂMETROS	
Coefficiente de transferência de cisalhamento para fissura aberta	0,2
Coefficiente de transferência de cisalhamento para fissura fechada	0,6
Resistência última uniaxial à tração (Mpa)	4,09
Resistência última uniaxial à compressão	-1
Resistência última biaxial à compressão	0
Estado de tensão hidrostática ambiente	0
Resistência última biaxial à compressão sob o estado de tensão hidrostático ambiente	0
Resistência última uniaxial à compressão sob o estado de tensão hidrostático ambiente	0
Coefficiente multiplicador de rigidez para condição fissurada na tração	0

O carregamento foi aplicado de forma incremental, conforme já mencionado, devido à consideração da não linearidade física. O incremento de carga foi controlado utilizando-se o recurso do ANSYS denominado 'Automatic Load Stepping'.



De acordo com a documentação do ANSYS, o recurso citado, aumenta o valor do incremento de carga, caso o processo venha a convergir de forma sistemática na primeira iteração, e por outro lado reduz o valor do incremento quando a previsão do número de iterações ultrapassa o limite estabelecido (no caso, 1000), caso se obtenha incrementos de deformações plásticas maiores que 15% ou ainda deslocamentos excessivos.

O método para resolução do sistema não linear utilizado foi o de 'Newton Raphson Pleno', caracterizado pela atualização da matriz de rigidez tangente a cada iteração. O critério de convergência foi estabelecido com base no vetor de resíduo de forças e momentos $\{R\}$, sendo satisfeito quando a norma deste vetor, $\|\{R\}\|$, atinge valores menores ou iguais à tolerância estabelecida, no caso um por cento da norma do vetor de forças e momentos aplicados, $(0,01 \cdot \|\{F^a\}\|)$. A norma utilizada foi a quadrática explicitada na equação 4 abaixo.

$$\|\{R\}\| = (\sum Ri^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Equação 4})$$

4 Resultados e discussões

Buscando validar a estratégia de modelagem adotada descrita anteriormente no item 3, foi construído e simulado modelos numéricos de lajes alveolares protendidas, cujos resultados foram comparados com aqueles experimentais e teóricos apresentados em Catoia (2011).

Tendo em vista o grande número de lajes testadas numericamente, foi criado um script contendo uma sequência de comandos, os quais são executados pelo ANSYS permitindo gerar automaticamente o modelo desejado da laje alveolar protendida.

Os comandos de interesse foram escritos em função de uma série de parâmetros como, por exemplo, número e tamanho das cordoalhas, propriedades dos materiais, geometria da laje ensaiada, tipos de carregamento, entre outros, os quais variam (ou podem variar) de laje para laje.

O primeiro parâmetro utilizado para a validação do modelo numérico foi o deslocamento vertical de um ponto específico da laje em função da aplicação da carga. Em seguida analisou-se o escorregamento relativo das cordoalhas na extremidade das lajes, e também ao longo do vão de algumas delas. Foi analisada ainda, a distribuição das tensões na seção transversal pertencente a 2,5 vezes a altura da seção, mostrado na figura 8, bem como a deformação nos pontos de aplicação da carga, onde é aplicada a protensão no elemento estrutural.

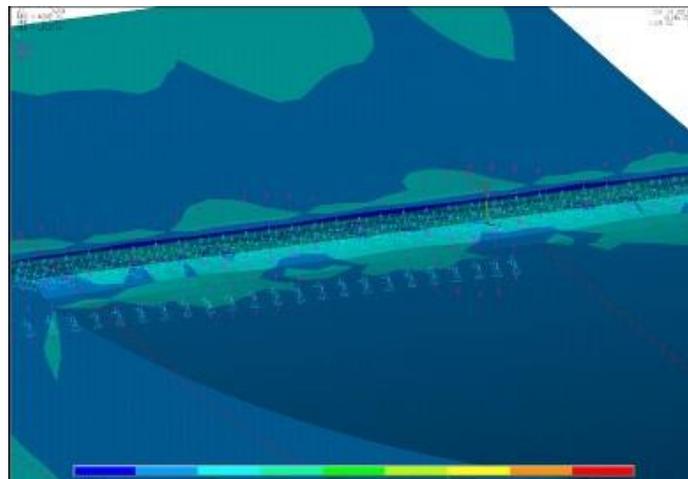


Figura 8 – Deformação na seção de aplicação da carga. (Autor)

Além da validação descrita, via comparação numérico x experimental, foram avaliados outros aspectos referentes aos modelos numéricos. As condições de contorno influenciam diretamente nos resultados e fez-se necessário verificar os elementos onde seria realizado o corte longitudinal da laje para aplicação da simetria, ou teriam os deslocamentos em x, y e z restringidos (confinamento total), ou teriam somente na direção x restringido (confinamento lateral) ou os elementos ficariam livre (sem confinamento). Através dos resultados conclui-se que não influi diretamente na resistência ao cisalhamento esse parâmetro, portanto seguimos a calibração sem confinamento. Abaixo na figura 9, tem-se uma análise comparativa a respeito dos indicativos de possibilidades de fissuração na laje de concreto, fornecidos pelo ANSYS.

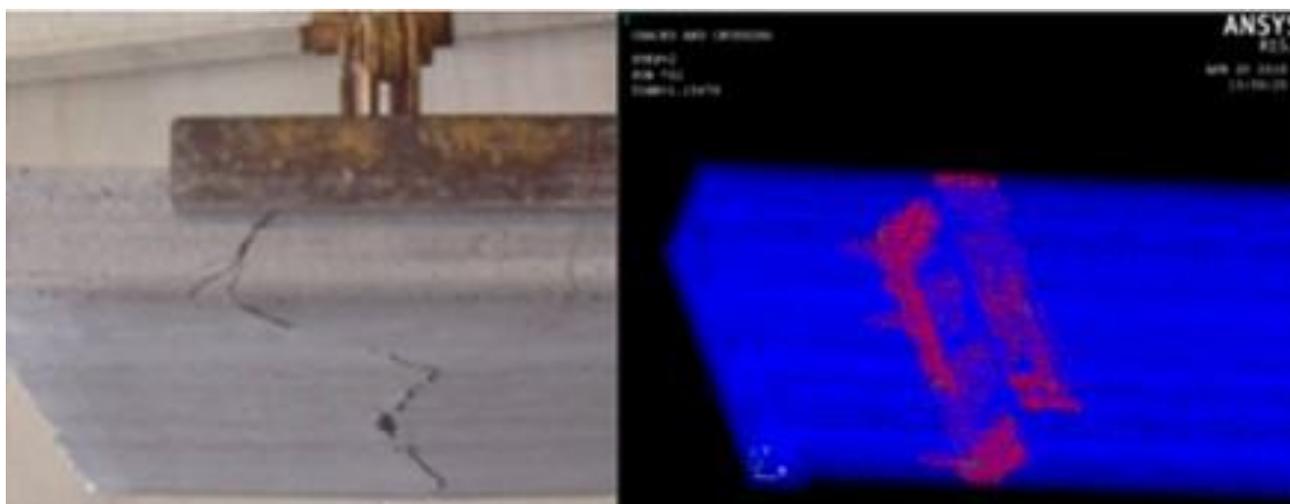


Figura 9 – Modo de falha experimental e numérico. (Autor)

Por fim, é realizada uma análise quanto à identificação do modo de falha nos modelos numéricos. A fim de demonstrar a curva de resistência ao cisalhamento x deslocamento vertical, na figura 10 e figura 11 abaixo (referente ao deslocamento vertical no ponto de aplicação da carga) são apresentados os resultados numéricos para a laje lote Z da Catoia (2011). Percebe-se que o formato da curva coincide com o experimental e o modo de falha é semelhante. O ponto de fissuração é importante pois retrata o pico da resistência, mesmo que após a “quebra da laje” seja possível ainda que experimentalmente e numericamente continuar aplicando carga.

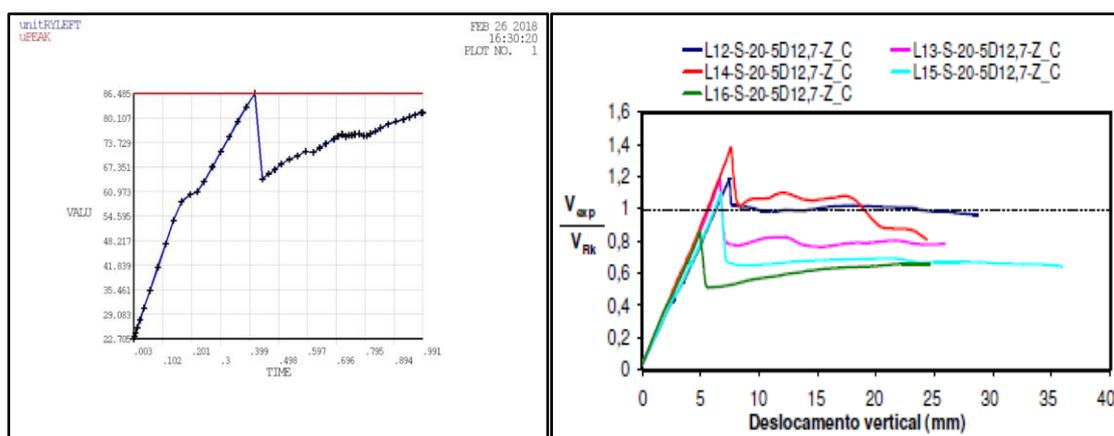


Figura 10 e Figura 11 – Gráficos Resistência ao cisalhamento x deslocamento vertical experimental e numérico. (Autor)

Para fins de comparação com os resultados numéricos, experimentais e teóricos, no cálculo do esforço resistente de cisalhamento não foram utilizados coeficientes de segurança. Além disso, para as propriedades dos materiais foram adotados valores médios ou impostos por Catoia (2011), e não característicos.

A seguir, na figura 12, segue o resultado obtido em quilonewton (kN), uma comparação entre os valores de cisalhamento característico encontrados por meio das normas ABNT 14861 (NBR, 2011) e ABNT 6118 (NBR, 2014), V_{rk} 14861 de acordo com a ABNT 14861 (NBR, 2011) e V_{rk} 6118 de acordo com a ABNT 6118 (NBR, 2014). Logo ao lado encontra-se o resultado experimental (V_{rex}) e por fim o resultado numérico (V_{rn}).

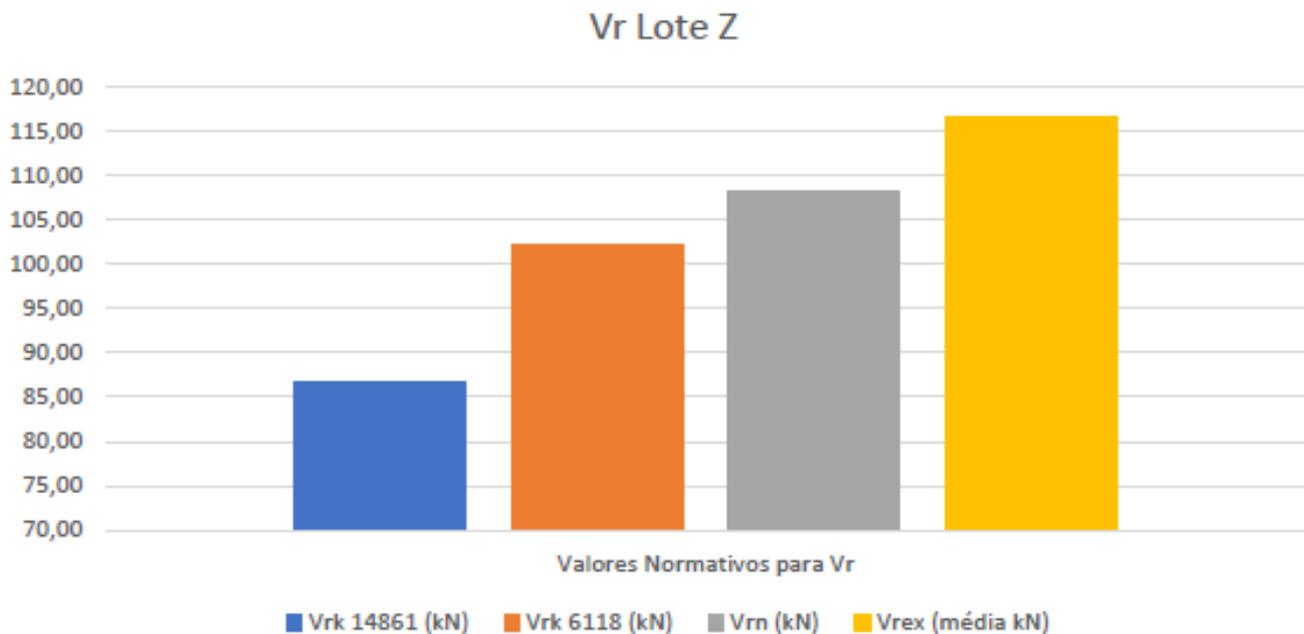


Figura 12– Valores de resistência última cisalhamento. (Autor)

5 Conclusão

Após todos os testes conclui-se que a norma técnica está muito conservadora no que diz respeito ao cisalhamento, diminuindo os valores de cisalhamento último em torno de 20% quando comparado com os resultados do modelo numérico. A NBR 14861(2011) é ainda 15% mais conservadora que a NBR 6118(2003), e 25% mais conservadora que a média dos valores de cisalhamento último para o lote Z de Catoia (2011), nas condições apresentadas.

Vale ressaltar que esta conclusão refere se exclusivamente ao caso particular analisado neste trabalho, não podendo ser extrapolado para outras situações. Dessa forma, cada caso particular deve ser analisado individualmente a fim de se determinar todos parâmetros envolvidos na análise numérica.



6 Referências

ANSYS(R). **Referência teórica, versão 15.0**. ANSYS, Inc., 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14861:2011 Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido — Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118:2014 Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

CATOIA, B. **Lajes alveolares protendidas: Cisalhamento em região fissurada por flexão**. Dissertação (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2011.

COSTA, O. O. **Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2009.

FERNANDES, N.S. **Cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido: ensaio padrão de apoio para controle de qualidade**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2007.

KOTINDA, T.I.; **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2006.

MARQUESI, M.L.G.; **Contribuição ao estudo dos mecanismos resistentes à força cortante em lajes alveolares protendidas**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2014.

RETTNE, L.; EDEKLING, K.. **Improved design method for web shear tension failure in hollow core units**. Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering in Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2006.