



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Calibração dos parâmetros do modelo de plasticidade do dano no programa *ABAQUS* para análise em elementos finitos de lajes lisas protendidas

**Gabriela Dalfollo Brackmann¹, René Quispe Rodriguez²,
Rogério Cattelan Antochaves de Lima³, Almir Barros da Silva Santo Neto⁴**

¹ Universidade Federal de Santa Maria / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil /
gabrielabrackmann@hotmail.com

² Universidade Federal de Santa Maria / Departamento de Engenharia Mecânica / rene.rodriguez@ufsm.br

³ Universidade Federal de Santa Maria / Departamento de Estruturas e Construção Civil / rogerio@ufsm.br

⁴ Universidade Federal de Santa Maria / Departamento de Estruturas e Construção Civil / almir.neto@ufsm.br

Resumo

Para desenvolver um modelo numérico capaz de simular o comportamento observado experimentalmente é necessário adotar modelos constitutivos que descrevam adequadamente o comportamento dos materiais. Para o concreto, o programa *ABAQUS* oferece um modelo de plasticidade do dano, o *Concrete Damaged Plasticity Model* (CDP). A resposta do modelo numérico depende das propriedades mecânicas dos materiais e de parâmetros próprios do CDP. Não há como determiná-los experimentalmente, sendo necessário fazer o ajuste dos parâmetros para cada situação analisada. Assim, este trabalho busca avaliar a influência dos parâmetros do CDP na curva carga-deflexão do modelo em elementos finitos de duas lajes lisas protendidas e ajustar os parâmetros do CDP para as lajes analisadas, a fim de estabelecer se o modelo constitutivo adotado é adequado e capaz de convergir com os resultados experimentais. A partir da análise dos resultados, pode-se concluir que a variação do parâmetro f_{b0}/f_{c0} não teve influência expressiva na resposta do modelo numérico, o qual se mostrou dependente do ângulo de dilatação e muito sensível à taxa de liberação de energia por fratura (G). Além disso, o tempo de processamento do modelo numérico mostrou depender diretamente da viscosidade do modelo constitutivo, sendo necessário calibrar esse parâmetro a fim de adotar a menor viscosidade possível, mas com um esforço computacional compatível com a complexidade do modelo. Apesar de ainda não terem sido incluídos no modelo a interface não-aderente dos cabos e as placas de ancoragem, apenas com o ajuste dos parâmetros do CDP os resultados numéricos já apresentam boa convergência com os resultados experimentais, indicando que o modelo é adequado e possui potencial para simular o comportamento mecânico das lajes analisadas. Espera-se que, com a inclusão da interface dos cabos e das placas de ancoragem, a resposta do modelo numérico consiga se aproximar ainda mais do comportamento observado experimentalmente.

Palavras-chave

Modelo de plasticidade do dano; Análise numérica; Lajes lisas protendidas; Modelo em elementos finitos.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

1. Introdução

As lajes lisas protendidas são cada vez mais utilizadas em edificações devido aos diversos benefícios que o sistema apresenta, dentre eles a rapidez construtiva, a economia em fôrmas, a redução no número de pilares, o aumento dos vãos livres e a possibilidade de redução na altura total do pavimento devido à maior esbeltez da laje. No Brasil, a técnica construtiva mais utilizada para lajes é a opção com cabos não-aderentes, devido à maior facilidade executiva, menores custos do sistema e possibilidade de reparo ou substituição de cabos em caso de ruptura ou defeito.

Nas últimas décadas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem sido muito utilizado pela comunidade acadêmica como uma ferramenta numérica valiosa no estudo do comportamento de elementos estruturais. O poder computacional atual tem viabilizado o uso do método em problemas considerados de alta complexidade, que antes só eram possíveis de serem analisados mediante ensaios experimentais, os quais possuem custos elevados e, no caso de elementos protendidos, apresentam dificuldades relacionadas à execução da protensão. Para desenvolver um modelo numérico capaz de representar o comportamento observado experimentalmente para um elemento estrutural, é necessário adotar modelos constitutivos que descrevam adequadamente o comportamento dos materiais. Para o concreto, o programa *ABAQUS* oferece um modelo de plasticidade do dano, o *Concrete Damaged Plasticity Model* (CDP). A resposta do modelo numérico depende das propriedades mecânicas dos materiais, que podem ser obtidas experimentalmente ou através de equações, e também de parâmetros próprios do CDP. Não há como determiná-los experimentalmente, sendo necessário fazer o ajuste dos parâmetros para cada situação analisada. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência dos parâmetros do CDP na curva carga-deflexão obtida pelo modelo em elementos finitos para duas lajes lisas protendidas, comparando-as com os resultados experimentais apresentados por Ellobody e Bailey (2008), e ajustar os parâmetros do CDP para as lajes analisadas, a fim de estabelecer se o modelo constitutivo é adequado e capaz de convergir com os resultados experimentais.

2. Modelo experimental de referência

Como referência para calibrar o modelo, foram utilizados os resultados experimentais obtidos por Ellobody e Bailey (2008) para as lajes lisas protendidas com cabos não-aderentes denominadas T1 e T2. As lajes ensaiadas possuíam 1,6 m de largura, 16 cm de espessura e um vão efetivo entre apoios de 4,0 m. Em cada laje foram posicionados 3 cabos monocordoalha de 15,7 mm, com 150 mm² de área, em traçado parabólico, e nas ancoragens foi disposta armadura de fretagem, sendo essa a única armadura passiva utilizada. A laje T1 possuía agregado graúdo à base de calcário e no dia do ensaio a resistência média à compressão do concreto foi de 44,4 MPa. Enquanto isso, a laje T2 possuía agregado graúdo à base de sílica e concreto com resistência média à compressão de 48,2 MPa.

A força de protensão aplicada em cada cabo foi de 195 kN, correspondente a 70% da carga de ruptura. As perdas imediatas de protensão, causadas pelo atrito, acomodação das ancoragens e encurtamento elástico da laje totalizaram 25,9 kN (13,3% da força de protensão aplicada), resultando em uma força de protensão efetiva de 169,1 kN. Duas vigas de aço foram utilizadas para simular apoios de 1° e 2° gêneros para a laje, e um pistão hidráulico foi utilizado para carregar as lajes em 4 pontos, com o uso de placas com dimensões de 160 x 35 x 4 cm para distribuir a carga.

Durante a execução do ensaio da laje T1, quando a carga aplicada era igual a 106,7 kN, a laje foi descarregada para 41,7 kN. Na sequência, retomou-se o carregamento da laje, que foi novamente descarregada quando atingiu a carga de 131,2 kN, com deflexão no meio do vão de 17,4 mm. A carga de ruptura foi igual a 156,2 kN, com uma deflexão no meio do vão de 58,1 mm. Não foi informado o motivo pelo qual utilizou-se esse esquema de carga/descarga para a laje T1. Para a laje T2 o carregamento foi aplicado de forma contínua, resultando em uma carga de ruptura de 178,2 kN, com 93,5 mm de deflexão no meio do vão.

3. Modelo em elementos finitos

Para modelar as lajes lisas protendidas foram utilizados o elemento sólido linear de 8 nós C3D8R e o elemento de treliça tridimensional de 2 nós T3D2, disponíveis no programa *ABAQUS*, para representar a laje de concreto e os cabos de protensão, respectivamente. Este trabalho aborda as análises iniciais realizadas para o desenvolvimento de um modelo numérico capaz de simular o comportamento mecânico de lajes lisas protendidas com cabos não-aderentes, que ainda se encontra em andamento. Por este motivo, neste artigo as placas de ancoragem ainda não foram incluídas no modelo, bem como a interface não-aderente dos cabos de protensão. Como estratégia de modelagem, deu-se prioridade ao ajuste dos parâmetros do modelo constitutivo do material, de forma a incluir a não-linearidade física presente no sistema e determinar se estes modelos constitutivos são adequados para as simulações numéricas a serem realizadas, antes de prosseguir com a modelagem da interface dos cabos e das ancoragens.

Com a definição dos tipos de elementos finitos a serem utilizados, criou-se a geometria das lajes de concreto e dos cabos de protensão, que foram posicionados no interior das lajes considerando, neste trabalho, uma aderência perfeita entre os materiais a fim de viabilizar a consideração dos esforços da protensão na laje. A protensão foi introduzida no modelo na forma de uma pré-tensão nos cabos, equivalente à força efetiva de protensão, e incluída no modelo em uma etapa anterior à aplicação da carga incremental.

As condições de contorno do ensaio experimental foram reproduzidas no modelo e, para simular o carregamento distribuído nas quatro placas, dividiu-se a laje em diversas seções, como pode ser visto na Figura 1, possibilitando aplicar a carga incremental apenas nas áreas equivalentes às placas e o peso próprio da laje em todo o elemento. Além disso, próximo aos apoios, também foram criadas seções para auxiliar no refinamento da malha.

Para as lajes de concreto adotou-se uma malha em elementos finitos de dimensão aproximada de 50 mm (*mesh seed*), sendo que nas regiões próximas aos apoios, em uma faixa de 300 mm, refinou-se a malha para elementos de dimensão aproximada de 25 mm (*mesh seed*), como pode ser visto na Figura 2. Para os cabos de protensão foram utilizados elementos finitos com dimensão aproximada de 50 mm. Um estudo de sensibilidade da malha foi realizado, o qual demonstrou que essa configuração era a mais apropriada, com bons resultados e sem problemas de convergência do modelo, com a malha totalizando 9.504 elementos sólidos e 264 elementos de treliça, com 13.467 nós.

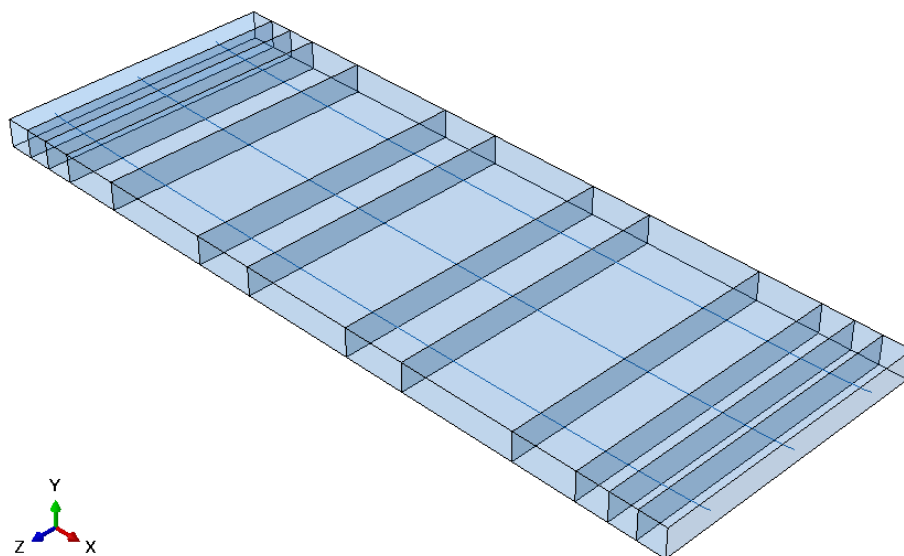


Figura 1 – Vista geral da laje e dos cabos de protensão, com as seções delimitadas.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

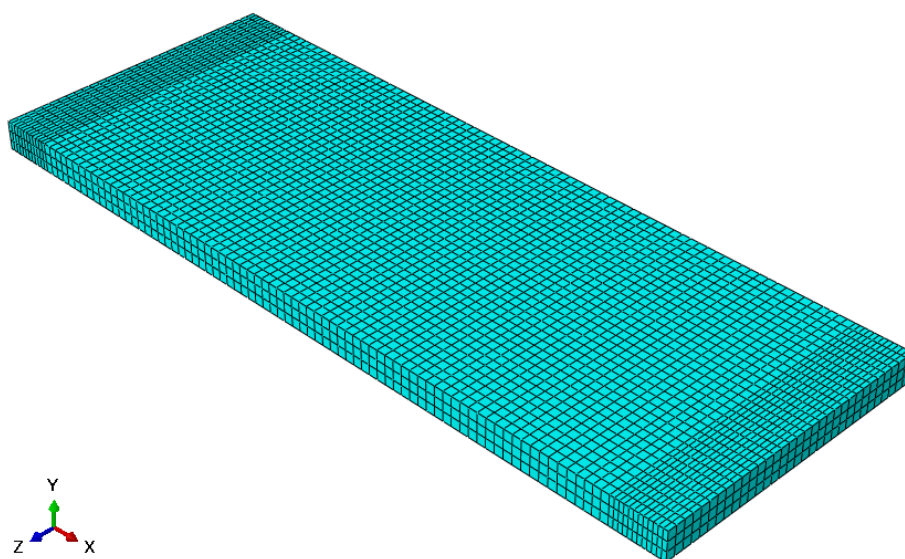


Figura 2 – Malha em elementos finitos.

3.1 Modelos constitutivos dos materiais

Para o aço dos cabos de protensão, adotou-se um modelo elasto-plástico, com diagrama tensão-deformação não-linear. Para simular o comportamento do concreto, optou-se por utilizar o *Concrete Damaged Plasticity Model* (CDP), disponível no programa *ABAQUS*, o qual será apresentado na próxima seção. As propriedades dos materiais utilizadas no modelo numérico são apresentadas nos Quadros 1 e 2, para o aço dos cabos de protensão e o concreto, respectivamente. Os valores referentes ao módulo de elasticidade e tensão de escoamento do aço e a resistência média à compressão (f_{cm}) do concreto foram obtidos experimentalmente por Ellobody e Bailey (2008). Para o coeficiente de Poisson do aço e do concreto adotaram-se os valores de 0,3 e 0,2, respectivamente. O módulo de elasticidade do concreto não foi apresentado em Ellobody e Bailey (2008), de forma que foi necessário fazer uma aproximação para obter esta grandeza. A partir da inclinação das curvas carga-deflexão experimentais das lajes T1 e T2, determinou-se a rigidez do sistema que, de forma aproximada, foi utilizada para o módulo de elasticidade do concreto.

A resistência à compressão do concreto (f_c) foi calculada pela Equação (1), com relação à resistência média do concreto obtida no dia no ensaio em corpos de prova cúbicos. A tensão limite de proporcionalidade (f_{c0}) e a resistência à tração (f_t) do concreto foram calculadas com as equações (2) e (3), respectivamente. As equações (1) a (3) foram as mesmas utilizadas no modelo numérico de Ellobody e Bailey (2008).

$$f_c = 0,67 \cdot f_{cm} \quad (1)$$

$$f_{c0} = 0,33 \cdot f_c \quad (2)$$

$$f_t = 0,1 \cdot f_c \quad (3)$$

Quadro 1 – Propriedades do aço dos cabos de protensão.

Módulo de elasticidade (GPa)	218
Coefficiente de Poisson	0,3
Tensão de escoamento (MPa)	1.703,33



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Quadro 2 – Propriedades do concreto.

	Laje T1	Laje T2
Módulo de elasticidade (MPa)	44.766	44.583
Coefficiente de Poisson	0,2	0,2
Resistência média à compressão (MPa)	44,4	48,2
Tensão de plastificação (MPa)	9,82	10,66
Resistência à tração (MPa)	2,97	3,23

3.2 Concrete Damaged Plasticity Model

Para utilizar o *Concrete Damaged Plasticity Model* (CDP) no programa *ABAQUS*, é necessário informar os valores de alguns parâmetros dos materiais, descritos a seguir.

- Ângulo de dilatação: parâmetro associado à mudança de volume, causada por deformações plásticas, que ocorrem em materiais frágeis como o concreto.
- Excentricidade: segundo o Manual do Usuário do *ABAQUS* (2012), o valor padrão igual a 0,1 mostra que o concreto possui o mesmo ângulo de dilatação para uma ampla faixa de tensões de pressão confinantes.
- f_{bo}/f_{co} : razão entre a resistência do concreto à compressão biaxial (f_{bo}) e a resistência à compressão uniaxial (f_{co}). O valor padrão para f_{bo}/f_{co} , de acordo com o Manual do Usuário do *ABAQUS* (2012), é igual a 1,16.
- K : fator de forma, com valor padrão igual a 0,667, segundo o Manual do Usuário do *ABAQUS* (2012).
- Viscosidade: o dano pode ser introduzido no modelo a partir da definição do parâmetro de viscosidade. Valores pequenos para a viscosidade (em comparação com o tempo de incremento característico Δt) tendem a produzir resultados mais precisos e com uma maior taxa de convergência, porém aumentam consideravelmente o esforço computacional. Assim, é necessário encontrar um valor com o qual seja possível obter o equilíbrio entre precisão, boa convergência e baixo custo computacional.
- Energia de fratura ou taxa de liberação de energia: segundo o fib Model Code 2010 (fib, 2013), a energia de fratura pode ser considerada como uma característica do material para descrever a resistência do concreto submetido a tensões de tração. A energia de fratura do concreto depende da relação água/cimento e do tamanho máximo dos agregados, bem como das condições de cura e da idade da amostra. Na ausência de dados experimentais para determinar a energia de fratura (G_F), o fib Model Code 2010 (fib, 2013) fornece a Equação (4), na qual G_F é dada em N.m/m² e a resistência média do concreto à compressão (f_{cm}) deve estar em MPa.

$$G_F = 73 \cdot (f_{cm})^{0,18} \quad (4)$$

4. Investigação e ajuste dos parâmetros do modelo constitutivo

Os parâmetros do modelo constitutivo foram ajustados individualmente para as lajes T1 e T2, visto que o processo de carga/descarga realizado durante o ensaio da laje T1 provocou deformações plásticas residuais na laje, tornando necessária a definição de parâmetros distintos para simular o comportamento observado experimentalmente. Por este motivo, a laje T2 foi escolhida como laje de controle para investigar a influência dos parâmetros do modelo CDP na curva carga-deflexão do modelo numérico, cujos resultados serão discutidos a seguir.

Para o fator de forma (K) e a excentricidade, foram adotados os valores-padrão de 0,667 e 0,1, respectivamente. A variação do fator f_{bo}/f_{co} foi analisada para valores entre 1,1 e 1,2, porém não houveram diferenças expressivas entre as simulações. Por este motivo, foi adotado o valor padrão de 1,16.

Para o ângulo de dilatação, realizaram-se simulações com valores variando de 35° a 42° . O ângulo de dilatação de 42° resultou em uma subestimativa da deflexão no meio do vão para a carga de ruptura (80,37 mm). Como pode-se observar na Figura 3, quanto menor o ângulo de dilatação utilizado no CDP, maior foi a deflexão do modelo numérico. Assim, o ângulo de dilatação foi definido igual a 35° , visto que resultou na deflexão mais próxima da observada experimentalmente (92,62 mm).

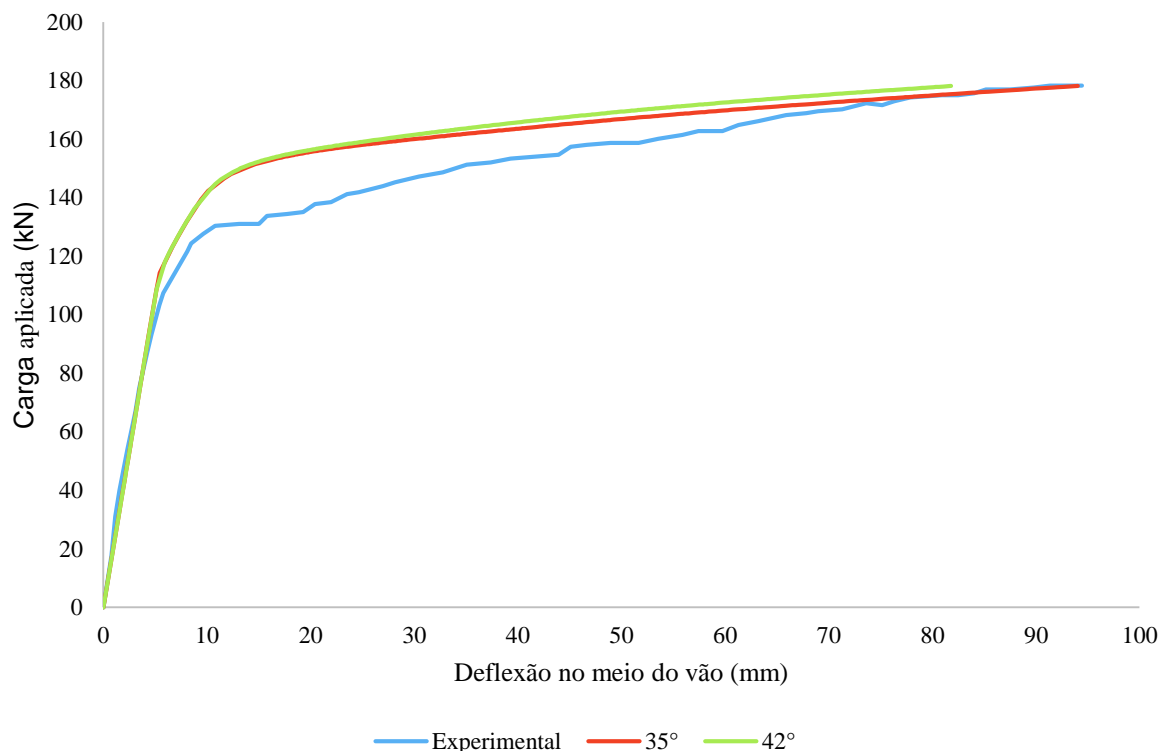


Figura 3 – Influência do ângulo de dilatação na curva carga-deflexão.

Para a energia de fratura, foram simulados os valores de $0,00217 \text{ kN.cm/cm}^2$, utilizado no modelo numérico de Ellobody e Bailey (2008), e $0,0014 \text{ kN.cm/cm}^2$, calculado com a Equação (5) do fib Model Code 2010, com o qual obteve-se uma melhor convergência da curva carga-deflexão do modelo numérico com a curva obtida experimentalmente. A Figura 4 ilustra a influência da energia de fratura na curva carga-deflexão da laje. As diferentes respostas mostram que a contribuição do comportamento à tração do concreto é bastante significativa na resposta da laje.

A Figura 5 apresenta os resultados das simulações considerando quatro valores para o parâmetro de viscosidade (μ). Para $\mu = 0,0005$, o modelo estimou uma deflexão na ruptura excessiva (171 mm) e houve um aumento considerável no tempo de processamento, como pode ser visto na Figura 6. Enquanto isso, para $\mu = 0,005$ e $\mu = 0,01$, houve uma grande redução do tempo de processamento, mas a curva carga-deflexão do modelo numérico se distanciou muito da curva experimental. Dessa forma, o parâmetro de viscosidade foi definido como sendo igual a 0,001, visto que apresentou uma melhor aproximação com a curva experimental (Figura 5) e esforço computacional moderado (Figura 6).



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

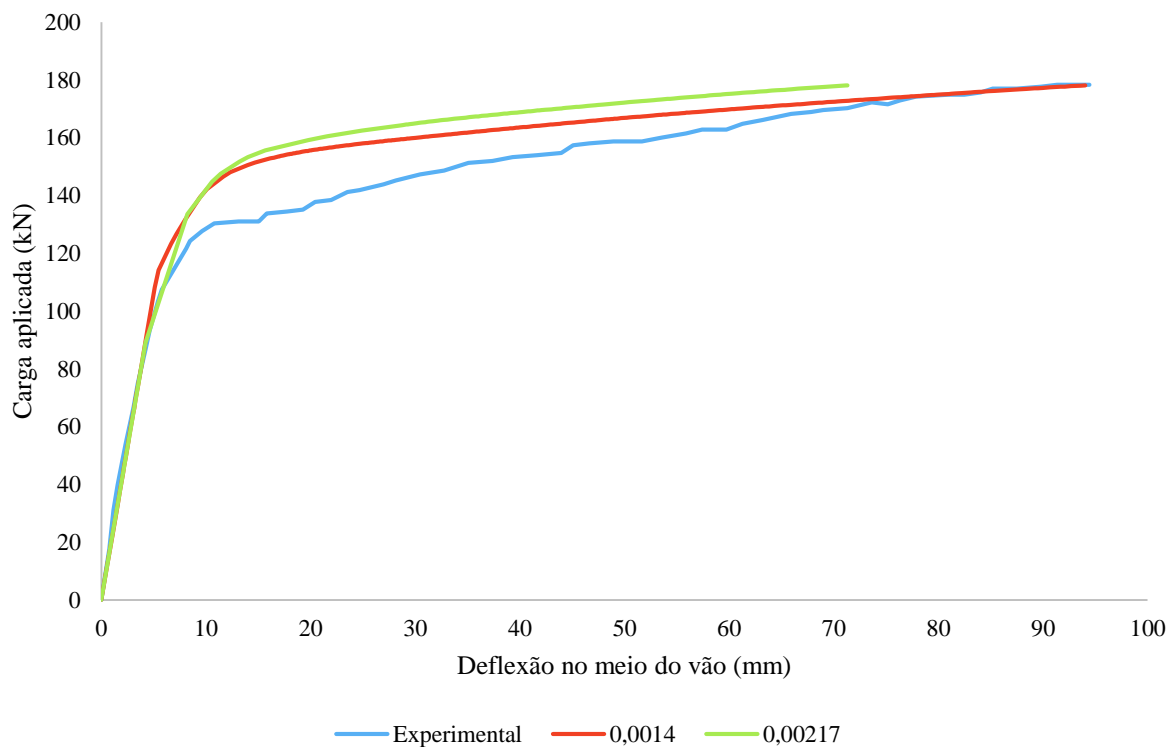


Figura 4 – Influência da energia de fratura na curva carga-deflexão.

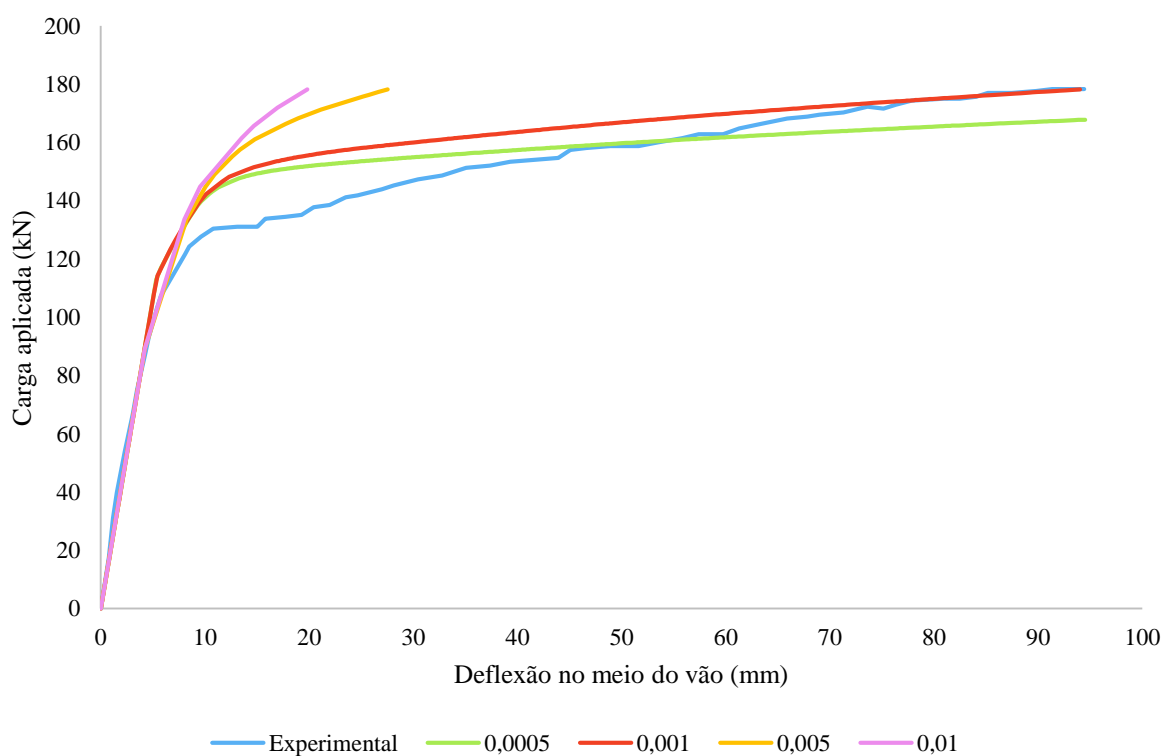


Figura 5 – Influência da viscosidade na curva carga-deflexão.

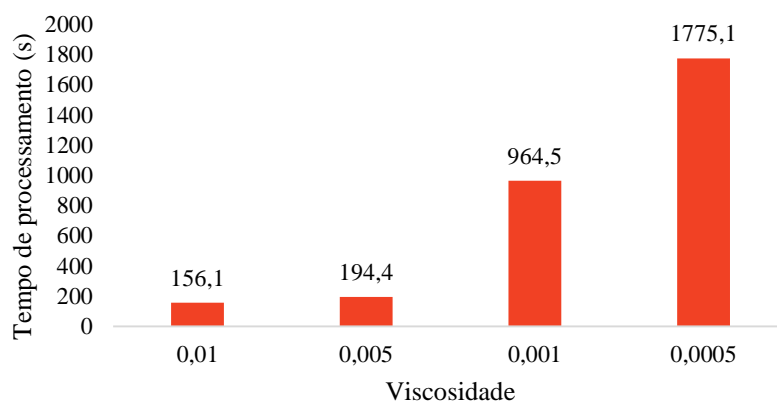


Figura 6 – Variação do esforço computacional associado ao parâmetro da viscosidade.

5. Resultados

Os parâmetros do *Concrete Damaged Plasticity Model* foram ajustados individualmente para as lajes T1 e T2, comparando-se as curvas carga-deflexão obtidas com o modelo em elementos finitos com as curvas obtidas experimentalmente. A Tabela 1 apresenta os parâmetros adotados para as lajes, onde pode-se notar diferença entre as lajes T1 e T2 apenas na energia de fratura. Essa diferença deve-se às características distintas do concreto utilizado nas lajes e também ao processo de carga/descarga empregado no ensaio da laje T1, que provocou possíveis deformações plásticas residuais e redução da inércia da seção devido a fissuração interna do material, fatos que não puderam ser representados no presente modelo numérico.

Tabela 1 – Resultado do ajuste dos parâmetros.

Parâmetros	Laje T1	Laje T2
Ângulo de dilatação	35°	35°
Excentricidade	0,1	0,1
f_{bo}/f_{co}	1,16	1,16
Fator de forma (K)	0,667	0,667
Viscosidade	0,001	0,001
Energia de fratura (kN.cm/cm ²)	0,0008	0,0014

Na Tabela 2 há um comparativo das deflexões obtidas com o modelo numérico em relação às deflexões medidas experimentalmente, onde observa-se uma excelente convergência dos resultados, com erro de 0,95% para a laje T1 e 0,94% para a laje T2. A Figura 7 apresenta a configuração deformada da laje T2, similar à obtida para a laje T1, com a deflexão máxima para a carga de ruptura da laje.

Tabela 2 – Comparativo das deflexões dos modelos experimental e numérico.

Laje	Carga (kN)	Deflexão modelo experimental (mm)	Deflexão modelo numérico (mm)	Erro (%)
T1	156,20	58,10	58,65	0,95
T2	178,20	93,50	92,62	0,94

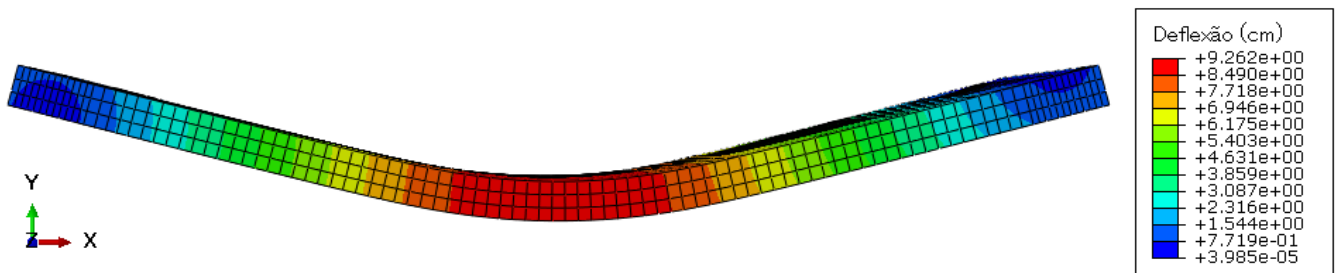


Figura 7 – Deformada da laje T2.

A curva carga-deflexão obtida pelo modelo numérico para a laje T1 é apresentada na Figura 8, e na Figura 9 para a laje T2. Comparando-as com as curvas obtidas experimentalmente, observa-se que houve boa convergência entre os resultados numéricos e experimentais, indicando que o modelo numérico desenvolvido é adequado para simular o comportamento mecânico das lajes.

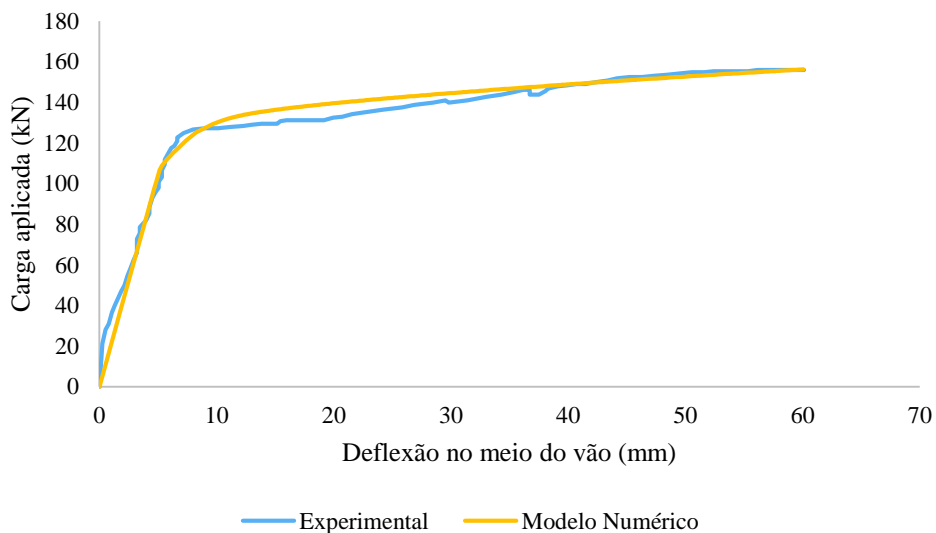


Figura 8 – Curvas carga-deflexão para a laje T1.

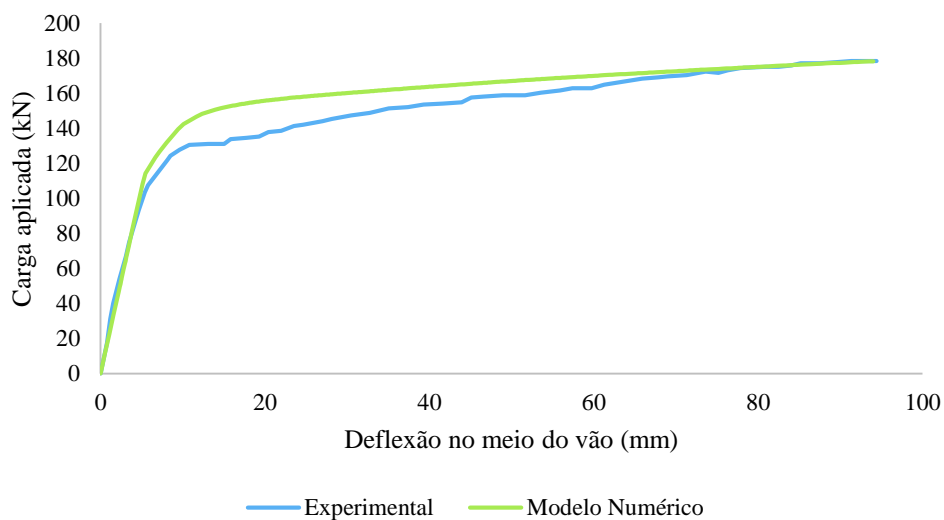


Figura 9 – Curvas carga-deflexão para a laje T2.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

6. Conclusões

Neste trabalho avaliou-se a influência dos parâmetros do modelo constitutivo adotado para o concreto, o *Concrete Damaged Plasticity Model*, disponível no programa *ABAQUS*, nas curvas carga-deflexão dos modelos numéricos de duas lajes lisas protendidas, denominadas T1 e T2, comparando-as com as curvas obtidas experimentalmente. Além disso, os parâmetros do modelo constitutivo foram ajustados individualmente para as lajes T1 e T2, devido às diferenças nas características do concreto utilizado nas lajes e na execução dos ensaios.

A partir dos resultados, pode-se concluir que para as lajes analisadas a variação do parâmetro f_{b0}/f_{c0} não teve influência expressiva na resposta do modelo numérico. Por outro lado, o modelo se mostrou dependente do ângulo de dilatação e muito sensível à energia de fratura, parâmetros que dependem das características do material e, por isso, precisaram ser ajustados individualmente para cada uma das lajes simuladas. A equação do fib Model Code 2010 (fib, 2013) para o cálculo da energia de fratura apresentou resultados coerentes para a laje T2, porém, para a laje T1, os resultados do modelo se distanciaram muito dos resultados experimentais. Nesse caso, foi necessário conduzir uma análise de sensibilidade para determinar-se a energia de fratura a ser adotada para a laje T1.

Além disso, concluiu-se que o tempo de processamento do modelo numérico é altamente dependente do parâmetro da viscosidade. O valor da viscosidade tem impacto direto no esforço computacional requerido para processar o modelo, de forma que é necessário calibrar esse parâmetro a fim de adotar a menor viscosidade possível, mas com um esforço computacional compatível com a complexidade do modelo e, ainda, manter uma boa correlação com os dados experimentais.

Apesar de ainda não haver sido incluído no modelo numérico a interface não-aderente dos cabos de protensão e as placas de ancoragem, apenas com o ajuste dos parâmetros do modelo constitutivo do concreto os resultados do modelo numérico já apresentaram boa convergência com os resultados experimentais, indicando que o modelo desenvolvido é adequado e possui potencial para simular o comportamento mecânico das lajes lisas protendidas. Espera-se que, com a inclusão da interface dos cabos e das placas de ancoragem, a resposta do modelo numérico consiga se aproximar ainda mais do comportamento observado experimentalmente.

Referências

- ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL. Providence, RI, USA. Dassault Systems Simulia Corp, 2012.
- ELLOBODY, E.; BAILEY, C.G. Behaviour of unbonded post-tensioned one-way concrete slabs. *Advances in Structural Engineering*, v. 11, no. 1, p. 107-120, 2008.
- INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (fib). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Lausanne, Switzerland, 2013.