



Objetivos:

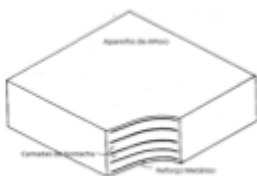
Esse projeto de pesquisa de iniciação científica buscou verificar o impacto de imperfeições construtivas no comportamento final dos aparelhos de apoio aos diferentes carregamentos impostos durante sua utilização em elementos estruturais de concreto pré-moldado. Esse estudo foi realizado por meio de uma análise paramétrica, por meio da simulação em elementos finitos de aparelhos de apoio elastoméricos no Software ABAQUS, onde diferentes considerações de carregamento e desalinhamento das placas de reforço interno foram estudadas. Os resultados foram comparados com condições de carregamentos centrado padrão sem a presença de desalinhamento interno das placas de aço, de maneira a se verificar os níveis de tensão na interface aço-borracha e nas placas de aço de reforço interno.

Utilização e composição dos Aparelhos de Apoio Elastoméricos:

Aparelhos de apoio elastoméricos são utilizados a mais de 30 anos em obras na engenharia, como pontes e viadutos, a fim de absorver os esforços atuantes na superestrutura e encaminhá-los uniformemente a subestrutura, acomodar às expansões devido a possível dilatação térmica, absorver pequenos movimentos devido as imperfeições e rugosidades dos elementos que compõem as estruturas, como as vigas e pilares, além de influenciar na estabilidade dos mesmos (CARDOSO e LIMA, 2017). São estruturas funcionais, economicamente viáveis e que não requerem frequente manutenção (STANTON, SCROGGINS, TAYLOR e ROEDER; 1990).

Sua estrutura é constituída de camadas de borracha (natural ou sintética) e chapas de aço, colocadas paralelamente entre as camadas de borracha, cuja ligação entre os mesmos é realizada pelo processo de vulcanização, conforme mostrado nas Figuras 1 e 2 abaixo (ROEDER; STANTON; 1983). Um processo de fabricação mal executado pode acarretar em imperfeições geométricas do elemento, como o desalinhamento das chapas de aço durante o processo de vulcanização, podendo afetar o funcionamento do elemento e, por conseguinte, até mesmo a estabilidade da estrutura como um todo. Essas patologias acarretam na distribuição não uniforme das cargas, levando a tensões, rotações e deslocamentos maiores e não uniforme do que o previsto, considerando apenas os efeitos dos carregamentos solicitantes (NUERNBERG; SILVA; 2013).

Figura 1 - Esquema de um aparelho de apoio.



Fonte: STANTON, SCROGGINS, TAYLOR e ROEDER; 1990.

Figura 2- Estrutura deformada de um aparelho de apoio quando solicitado.



Fonte: GONÇALVES, 2019.

Logo, o comportamento desses aparelhos de apoio é resultado da combinação das características dos materiais que os formam, uma vez que, nesse modelo de elemento, a borracha é responsável pela transmissão das cargas verticais sem que haja concentração de tensões devido à falta de uniformidade dos apoios, enquanto o aço é responsável por aumentar a rigidez axial do elemento de apoio, promovendo um confinamento maior da borracha e evitando um achatamento excessivo dessa.

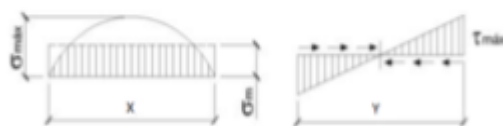
Solicitações atuantes nos aparelhos de apoio elastoméricos:

Por ser um elemento estrutural que liga os componentes verticais e horizontais de pontes, o aparelho de apoio recebe carregamentos uniaxiais de compressão e rotação tanto de esforços internos como externos do sistema, sendo responsável por dissipar esforços horizontais, sem que haja uma concentração de tensões nos apoios das OAE's.



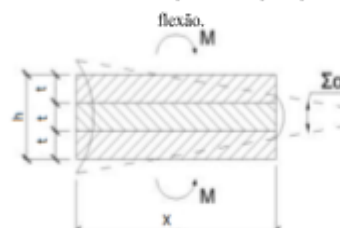
Para um aparelho de formato retangular com comprimento igual a “x” e largura igual a “y”, quando solicitado por forças compressivas e de flexão, a estrutura terá uma distribuição de tensões normais e cisalhantes conforme ilustrado na Figura Y e Y, respectivamente.

Figura 3 - Distribuição das tensões normais e cisalhantes no aparelho de apoio elastomérico.



Fonte: CHIMUAGA, 2015.

Figura 4 - Estrutura deformada do aparelho de apoio quando submetido a flexão.



Fonte: CHIMUAGA, 2015.

Modelagem utilizando Software ABAQUS (materiais, características, carregamentos aplicados):

Primeiramente, foi necessário realizar um treinamento e familiarização com o Software Abaqus, a fim de que a aluna fosse capaz, posteriormente, de construir modelos coerentes com a realidade. Os materiais constituintes dos AA foram criados no Software ABAQUS para compor as modelagens e suas respectivas características foram aplicadas, conforme resumido nas Tabelas abaixo.

Tabela 1 - Propriedades da borracha modelada

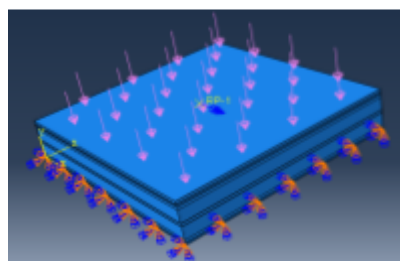
| Borracha | |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Densidade (Kg/m ³) | 1185 |
| Modelo utilizado | Neohookean |
| Módulo Cisalhamento (MPa) | 0,7 |
| Coefficiente compressibilidade (Pa) | 1,25*10 ⁻⁷ |

Tabela 2 - Propriedades do aço modelado

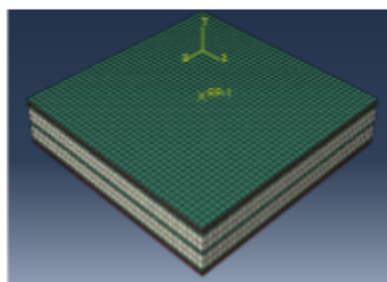
| Aço | |
|--------------------------------|----------------------|
| Densidade (Kg/m ³) | 7850 |
| Modelo utilizado | Elasto-plástico |
| Módulo elasticidade (Pa) | 2,0*10 ¹¹ |
| Coefficiente Possion | 0,3 |
| Tensão de escoamento (MPa) | 5*10 ⁸ |
| Resistência à ruptura (MPa) | 6,49*10 ⁸ |

As partes foram criadas, utilizando elementos sólidos, e os materiais de cada parte atribuídos (Figura 6). Em seguida, a malha de elementos finitos foi aplicada na qual, horizontalmente, o modelo foi dividido em 41 partes, e, na vertical, as camadas de borracha foram divididas em 2 partes, enquanto as chapas de aço e as de borracha de cobertura, usadas para proteção do aço, ficaram divididas em apenas uma parte. Por fim, as condições de contorno (engastamento da parte inferior) e os carregamentos foram aplicados (Figura 5).

Figuras 5 - Carregamentos e condições de contorno aplicados no modelo II Figura 6 - Materiais e malha utilizados no Modelo II



Fonte: Software ABAQUS



Fonte: Software ABAQUS

Legenda:

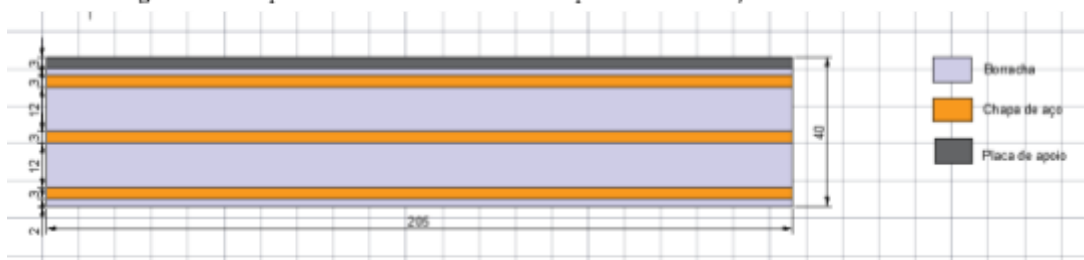
- Aço
- Borracha
- Borracha de

Com a modelagem do aparelho de apoio finalizada, cinco simulações foram realizadas, cada qual com carregamentos aplicados distintos. Além disso, nas duas primeiras situações as imperfeições geométricas não foram levadas em conta (modelo ilustrado na Figura 7), enquanto que nas últimas três simulações o desalinhamento das



placas de aço estava presente. Essas imperfeições geométricas foram modeladas no Software com o desenho das chapas de aço de inclinadas (sem paralelismo) entre as camadas de borracha dos modelos.

Figura 7 - Escopo do modelo II usado nas duas primeiras simulações.



A magnitude dos carregamentos aplicados foi aumentando de 5 em 5 MPa e de 0,002 em 0,002 radianos, para forças compressivas e de flexão, respectivamente, até a simulação ser interrompida. Essa interrupção ocorre quando o elemento atinge grandes deslocamentos, ultrapassando o limite de convergência adotado, indicando, por exemplo, que na prática poderia ter ocorrido a ruptura da borracha devido às altas deformações em cisalhamento internas do material. Os carregamentos limites encontrados para cada simulação estão indicados na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Simulações realizadas

| Simulação | Carregamentos aplicados | Valor limite | Imperfeição geométrica |
|-----------|-------------------------|--------------|------------------------|
| 1 | Compressão | 15 MPa | Não |
| 2 | Compressão | 15 MPa | Não |
| | Rotação | 0,006 rad | |
| 3 | Compressão | 12 MPa | Sim |
| 4 | Compressão | 12 MPa | Sim |
| | Rotação | 0,006 rad | |

Resultados obtidos:

As Tabelas 4 e 5 abaixo contém, em síntese, as principais tensões e deslocamentos obtidos no segundo modelo, para cada simulação realizada.

Tabela 4 - Principais tensões obtidas nas simulações do modelo II

| Modelo 2 | Chapa | | Borracha | |
|-----------------------------------|------------------------|-------|------------------|-------|
| | Tensão principal (MPa) | | Cisalhante (MPa) | |
| | Centro | Borda | Centro | Borda |
| Compressão | 22,5 | 18,2 | 0,095 | 3,82 |
| Compressão+Flexão | 22,75 | 18,25 | 0,167 | 4,14 |
| Desalinhamento +Compressão | 23,2 | 18,7 | 0,57 | 2,28 |
| Desalinhamento +Compressão+Flexão | 25 | 20 | 0,31 | 2,81 |

Tabela 5 - Principais deslocamentos obtidos nas simulações do modelo II



| Modelo 2 | Deslocamento total (mm) | | | Deslocamento específico da camada interna borracha (mm) | |
|--------------------------------------|-------------------------|------------|-----------|---|-------|
| | Vertical | Horizontal | Combinado | Centro | Borda |
| Compressão | 16,8 | 4,97 | 16,83 | 6,9 | 6,7 |
| Compressão+Flexão | 17,3 | 5,65 | 17,35 | 7,9 | 7,7 |
| Desalinhamento +Compressão | 12,39 | 5,08 | 12,39 | 5,8 | 6 |
| Desalinhamento +Compressão+Flexão | 12,97 | 5,14 | 13 | 6 | 5,6 |

Para a quarta simulação realizada, os carregamentos limites, que foram iguais a uma força de 12 MPa e uma rotação de 0,006 radianos, originaram uma estrutura deformada com tensões e deslocamentos (Figura 8) dentro dos limites de convergência adotados e da capacidade de deformação dos materiais, de forma que as tensões cisalhantes nas camadas de borracha (Figura 9) não provocaram deformações excessivas nas camadas de borracha, evitando a ruptura do material.

Figura 8 - Tensões e deslocamentos verticais obtidas na quarta simulação do modelo II

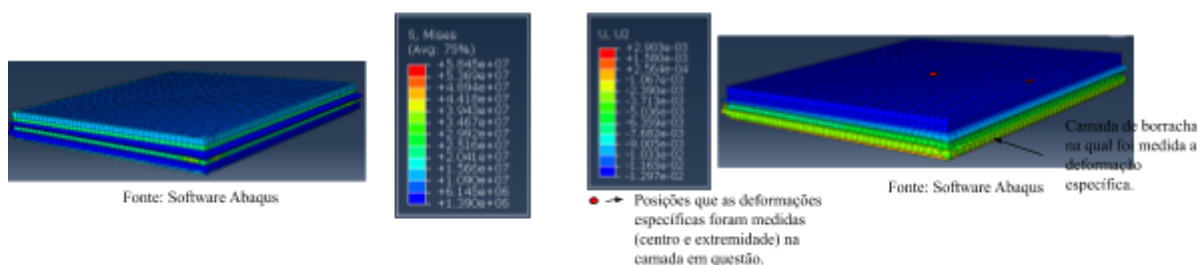
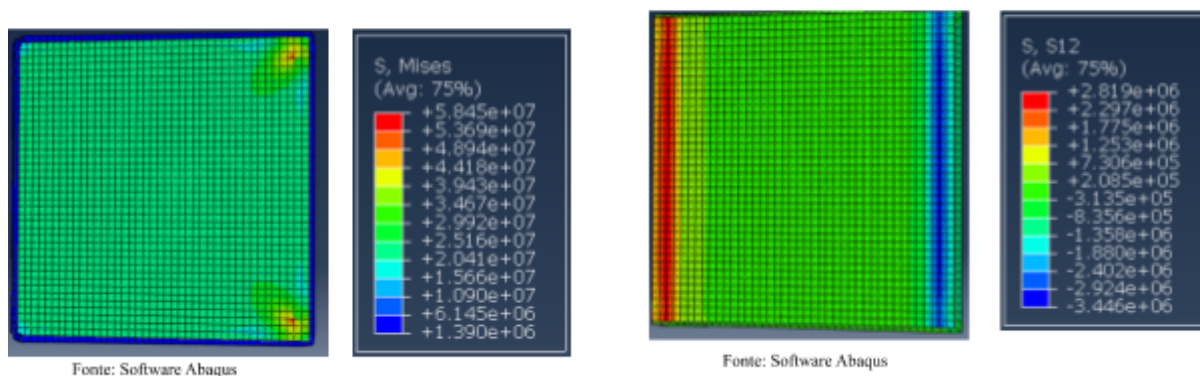


Figura 9 - Tensões normais e cisalhantes obtidas no reforço metálico na quarta simulação do modelo II



Discussão:

Com base nos resultados obtidos referentes às simulações realizadas, observou-se que a estrutura deformada foi reflexo dos esforços de compressão e flexão aplicados. A distribuição das tensões normais nos reforços metálicos e cisalhantes na borracha se comportaram de maneira similar a teoria e a realidade, como ilustrado na Figura 9. Além disso, foi possível observar a deformação parabólica das camadas de borracha entre as lâminas metálicas (“bulging lateral”) demonstrando que o modelo está funcionando conforme previsto (Figura 2).

As tensões nas chapas de aço do modelo II, para as simulações na ausência e presença das imperfeições geométricas, quando submetidos a compressão e flexão, apresentaram a mesma magnitude em ambos os cenários, em torno de 22 MPa no centro da chapa e 18 MPa nas bordas das mesmas. Vale ressaltar que as tensões encontradas nas chapas de aço do modelo II estão dentro dos valores limites do regime elástico-plástico do material, já que são inferiores a tensão de escoamento do aço ($F_y = 500 \text{ MPa}$) e, portanto, não houve a plastificação do mesmo. Logo, o aço manteve-se no regime elástico linear ao final da simulação, tendendo a retornar a sua forma e dimensões originais após o fim da aplicação do carregamento.



Já nas duas últimas simulações, que levam em conta as imperfeições geométricas, o desalinhamento do reforço metálico refletiu na estrutura deformada, na qual as camadas de elastômero não tiveram a mesma deformação específica entre elas. O módulo das tensões cisalhantes na interface aço-borracha do modelo II, para as simulações na ausência e presença das imperfeições geométricas, quando submetidos a compressão e flexão, se diferiu um pouco, sendo um pouco mais elevadas no modelo com a imperfeição geométrica, conforme mostrado na Tabela 4, mas a distribuição das tensões cisalhantes foi a mesma nas duas situações. Esse aumento das tensões cisalhantes na interface borracha-aço devido às imperfeições geométricas influenciam diretamente nas tensões as quais as chapas de aço estarão submetidas, uma vez que as mesmas são responsáveis por evitar o achatamento excessivo da borracha. Uma grande elevação nas tensões das chapas de aço pode levar aos problemas de plastificação do mesmo.

Além disso, observou-se que, em todas as simulações realizadas, os aparelhos de apoio não tiveram suas chapas internas de aço submetidas a tensões maiores que a tensão de escoamento e, portanto, não houve possibilidade de plastificação do aparelho de apoio. Logo, as diferenças no desempenho do elemento para as situações na ausência e presença das imperfeições geométricas foram consequência do desalinhamento das placas de aço, e não devido a alterações no comportamento dos materiais que compõem o elemento estrutural estudado. Isso porque, dependendo da magnitude do desalinhamento dos reforços metálicos, a diferença da deformação específica de uma camada de borracha para a outra será elevada, gerando um aparelho de apoio deformado com uma altura não uniforme, podendo ocasionar falta de estabilidade e surgimento de tensões adicionais no apoio, que não são previstas pelo engenheiro estrutural durante o projeto, uma vez que foge do comportamento esperado dos aparelhos de apoio elastoméricos.

Bibliografia:

CARDOSO, M. T., Lima, M. C. V. (2017). Análise Numérica De Instabilidade Lateral Em Viga Pré-Moldada Esbelta. *REEC - Revista Eletrônica De Engenharia Civil*, 13(2), 2017.

CHIMUAGA, L. P. B. Estudo do Comportamento estrutural dos aparelhos de apoio da ponte rio-niterói. Dissertação de Mestrado, Universidade federal fluminense, 2015.

GONÇALVES, Felipe R. **Manifestações patológicas de aparelhos de apoio e obras de arte especiais – estudo prático**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

NUERNBERG, Rafael; SILVA, Bruno do Vale. **ESTUDO DAS POSSÍVEIS CAUSAS DO DESLOCAMENTO LONGITUDINAL DE VIGAS SOBRE APARELHOS DE APOIO EM VIADUTO DA RODOVIA BR-101/SC**. UNESC - Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2013. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/2484/1/Rafael%20Nuernberg.pdf>.

ROEDER, C. W.; STANTON, J. F. Elastomeric Bearings: State-of-the-art. *Journal of Structural Engineering* 109(12), 1983.

STANTON, J. F.; SCROGGINS, G.; TAYLOR, A. W.; ROEDER, C. W. **Stability of Laminated Elastomeric Bearings**. *Journal of Engineering Mechanics*; Vol. 116. 1990.