

## ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM DISPOSITIVO DE CALAGEM PARA A COMPORTA ENSECADDEIRA DA BARRAGEM OITICICA EM JUCURUTU/RN

Alexandre Mateus Mendonça Bezerra, alexmateus11@yahoo.com.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av. Salgado Filho, Campus Central, Lagoa Nova, CEP 59.078-970 Natal/RN & Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte, Rua Dona Maria Câmara, Capim Macio, CEP 59082-43- Natal/RN, Brasil

**Resumo.** As comportas ensecadeiras são equipamentos robustos normalmente usados em estações de tratamento de esgoto, irrigação, e centrais hidrelétricas, com o objetivo de conter a passagem de água no sentido montante-jusante. Porém, quando a passagem de água é permitida, nem sempre são previstos mecanismos de estocagem destes equipamentos. Este trabalho possui como objetivo realizar uma análise estrutural do dispositivo de calagem da tomada d'água suplementar da barragem Oiticica em Jucurutu/RN, utilizado para apoiar e manter suspenso o painel inferior da comporta ensecadeira, durante o uso e abertura da tomada d'água, em face da necessidade de estocagem. Para isso, foi considerado uma viga em aço AISI 1020 de perfil "U" com dimensões 4" x 1.5/8" x 3/16", sendo realizados os cálculos de flexão para uma viga bi-apoiada, e também uma simulação estática estrutural, considerando a movimentação feita pela máquina de elevação. Os cálculos estruturais mostraram que a viga sugerida é suficiente para manter suspenso o painel inferior das comportas com segurança.

**Palavras chave:** Dispositivo de calagem, comporta ensecadeira, análise estrutural, flexão e segurança estrutural.

**Abstract.** Stoplogs are robust equipment normally used in sewage treatment plants, irrigation and hydroelectric power plants, with the aim of containing the flow of water in the upstream-downstream direction. However, when the passage of water is allowed, storage control of this equipment is not always planned out. The objective of this work is to carry out a structural analysis of the suspension device of the supplementary water intake of the Oiticica dam in Jucurutu/RN, used to support and maintain the lower panel of the stoplog during use and opening of the water intake, given the need for storage. For this, a U-beam with a 4"x1.5/8"x3/16" profile was considered, with bending stress calculations being performed for a beam supported on both ends, and a structural static simulation was carried out, considering the movement made by the electric hoist. The results of these calculations attested that the suggested beam is sufficient to safely keep the lower panel of the stoplog suspended.

**Keywords:** Suspension device, stoplog, structural analysis, bending and structural safety.

### 1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são fontes necessárias para o bom desenvolvimento de uma sociedade, através por exemplo da erradicação da falta de água, distribuição igualitária e controle de enchentes (Tundisi, 2008).

As comportas hidráulicas são equipamentos usados em bloqueios de passagem de água, sendo de importância em barragens, recebendo nomes de acordo com a sua aplicação e funcionamento. Dentre as comportas existentes, as mais comuns são as comportas segmento, comportas de emergência (vagão), e comportas ensecadeira (Erbisti, 2002).

As comportas do tipo ensecadeiras são utilizadas para vedação da passagem de água em tomadas d'água, quando se tem a necessidade de realização de uma manutenção ou mesmo reparo dos equipamentos localizados a jusante (Arakawa, 2013).

A Barragem Oiticica localizada em Jucurutu/RN visa regularizar o curso do rio Piranhas, passando a integrar o complexo de obras destinadas ao aproveitamento dos recursos hídricos gerados em sua bacia hídrica (KL, 2019), possuindo duas tomadas d'água tipo galeria, ambas com comportas ensecadeiras.

Na abertura das comportas ensecadeiras, os painéis ficam estocados em poços projetados para estes fins, que na ausência da previsibilidade destes itens, normalmente são realizados dispositivos práticos de estocagem.

Este é o caso dos dispositivos de calagem das comportas ensecadeiras da barragem de Oiticica, que se trata de uma viga metálica, utilizada para apoiar e manter suspenso o painel inferior da comporta ensecadeira, durante o uso e abertura da tomada d'água.

Para garantir a eficiência de produção, o cumprimento dos prazos e a segurança estrutural hidromecânica da barragem de Oiticica, é imprescindível acompanhar o andamento dos projetos, fabricação, execução e recebimento de equipamentos como estes.

O presente estudo técnico tem a finalidade de realizar uma análise estrutural do dispositivo de calagem projetado para manter suspenso o painel inferior da comporta ensecadeira da tomada d'água suplementar do Projeto de INtegração do Rio São Francisco PISF da barragem Oiticica em Jucurutu/RN.

## 2. MATERIAIS E METODOLOGIA

Este item inicia-se com a descrição do problema de estocagem, para posteriormente ser apresentado a solução, que será acompanhada das etapas de projeto e análise estrutural.

### 2.1 Problema de estocagem da comporta

No projeto hidromecânico da tomada d'água suplementar da barragem de Oiticica em Jucurutu/RN, existem duas grandes tubulações que se iniciam com DN. 2.600 mm e finalizam-se com DN. 2.000 mm, cada linha possuindo 2 painéis pertencentes à comporta ensecadeira.

No projeto está contemplado um poço de estocagem em cada linha (dois no total), suficiente para armazenar apenas um painel (superior), ficando dois painéis (um por linha) sem local para estocagem.

Diante deste cenário, foi proposto a instalação de um dispositivo de calagem por linha (dois no total), para que o elemento inferior da comporta fique estocado na parte superior da Ranhura de descida da comporta. O dispositivo de calagem em sua concepção simples, apoiará os patins das comportas, que por sua vez, manterá as comportas em suspensão, conforme a Fig. 1 ilustra.

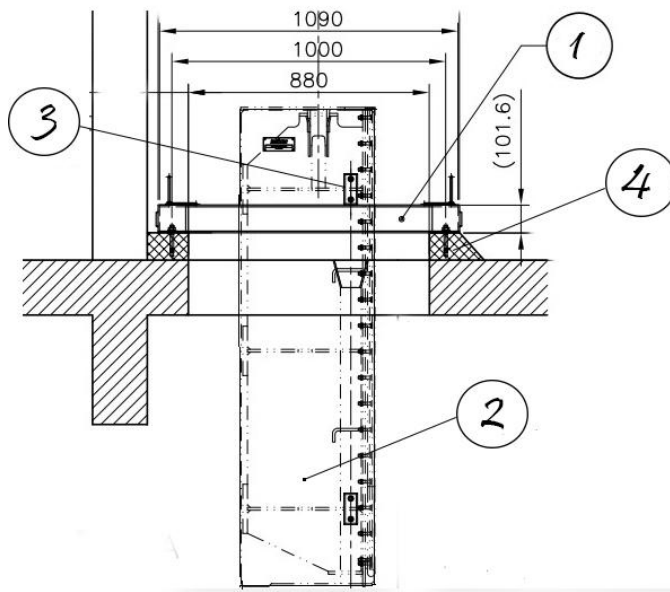


Figura 1. Esquema de posicionamento de sistema de suspensão. (1) Dispositivo de calagem tipo viga, (2) Painel inferior da comporta, (3) patim de apoio da comporta, (4) apoios de concreto.

Na Figura 1, é possível compreender o princípio de funcionamento de suspensão da comporta, onde os dois patins das comportas (ilustrado pelo balão “3”) ficam apoiados sobre as duas vigas de calagem (ilustrada como sendo o número 1). O patim trata-se do componente pertencente à comporta, que irá apoiar-se no dispositivo de calagem proposto, este componente é também o responsável por permitir a descida da comporta através de guias metálicas e por isso foi projetado em um material de pouco atrito.

A figura 2 mostra a comporta ensecadeira metálica em vista frontal contendo os patins laterais, conforme indicação.

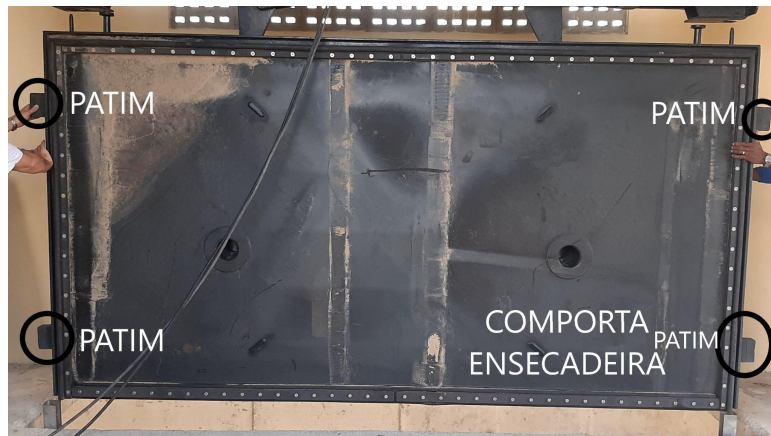


Figura 2. Comporta ensecadeira fabricada.

Os painéis só são estocados, quando a tomada d'água está aberta, ou seja, quando a comporta não está acionada impedindo a passagem de água do reservatório no sentido montante-jusante.

A solução para a estocagem dos painéis inferiores das comportas é o desenvolvimento de duas vigas de calagem para cada comporta, de forma a mantê-las suspensa quando na necessidade de abertura da tomada d'água.

O dispositivo de calagem proposto está representado pela Fig. 3, correspondendo a uma viga metálica de aço AISI 1020 de perfil "U" de dimensões 4" x 1.5/8" x 3/16" possuindo 1090 mm de comprimento total.

A configuração definida para este fim está mostrada na Fig. 3, sendo este elemento chamado de dispositivo de calagem das comportas.

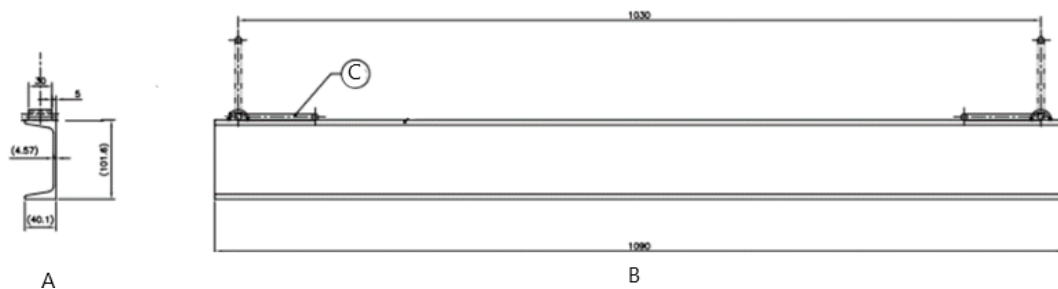


Figura 3. Dispositivo de calagem e suas dimensões. (A) Vista lateral, (B) Vista frontal e (C) Alça de suspensão.

## 2.2 Materiais considerados para a solução

A comporta ensecadeira e o dispositivo de calagem são de aço ASTM A36, a viga pescadora (equipamento responsável por pescar a comporta) é de aço AISI 1020. As propriedades dos materiais usados estão indicados na Tab. 1.

Tabela 1. Informações de componentes hidromecânico (Norton, 2004)

Propriedades	Componentes (Material)			
	Comporta ensecadeira (ASTM A36)	Viga de calagem (ASTM A36)	Viga pescadora (ASTM A36)	Patim das comportas (Teflon)
Massa (kg)	3150	8,82	426	2
Tensão de Escoamento (MPa)	250	250	250	-
Módulo de Elasticidade (GPa)	200-206,8	200-206,8	200-206,8	-

Coeficiente de Poisson	0,28	0,268	0,28	-
Tensão de ruptura (MPa)	350-393	350-393	350-393	29-40

### 2.3 Cálculo analítico de flexão para viga bi-apoiada

Para a definição dos valores dos momentos fletores e das forças cortantes de uma viga qualquer seja ela prismática ou não prismática há duas formas de efetuar esses valores: um pelo método do gráfico ou pelo método de funções singulares (cortantes e momentos).

O dispositivo de calagem funciona como uma viga bi-apoiada, com o objetivo de suspender a comporta através do contato com os patins das comportas. A Fig. 4 ilustra os mecanismos de apoio para a estocagem da comporta.

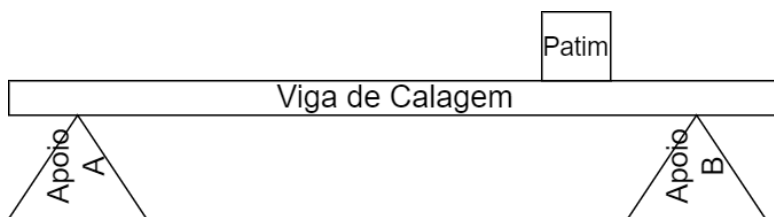


Figura 4. Configuração de viga bi-apoiada.

Na situação da viga de calagem, considerando o efeito da força peso do conjunto que está apoiado na viga, tem-se a seguinte configuração de atuação de forças (diagrama do corpo livre) mostrado na Fig. 5.

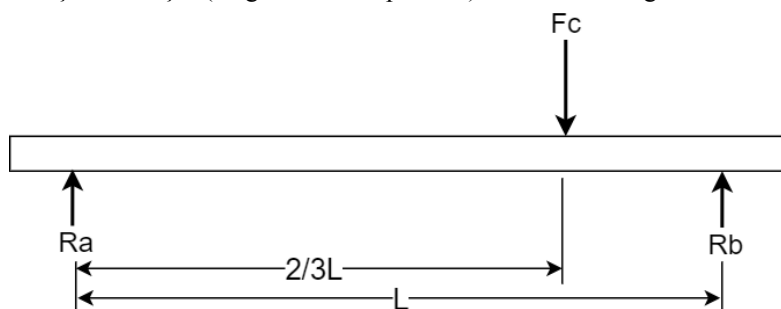


Figura 5. Representação das forças atuantes sobre a viga de calagem.

A força concentrada pode ser considerada como sendo o peso das comportas aplicado naquele ponto, multiplicado pelo coeficiente de segurança de impacto. O peso foi dividido por dois, por se tratar de duas vigas de calagem para cada comporta.

$$F_c = P/2 * CI \quad (1)$$

A somatória das forças em x e em y, e a somatória dos momentos, são calculadas através da Eq. (2,3,4) respectivamente.

$$\sum F_x = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_y = R_a + R_b - F_c = 0 \rightarrow R_a = F_c - R_b \quad (3)$$

$$\sum M_A = -F_c * 2/3L + R_b * L = 0 \rightarrow R_b = F_c/2 \quad (4)$$

O momento interno máximo da viga ocorre no centro da viga, mas como o patim está posicionado a  $\frac{2}{3}$  do comprimento total, então o momento fletor, chegou-se a Eq. (5).

$$M = \frac{F_c * L}{4} \quad (5)$$

A flexão com o uso deste momento foi determinada através da Eq. (6) de Hibbler (2010).

$$\sigma_f = \frac{M * c}{I} \quad (6)$$

Onde M é o momento fletor calculado pela Eq. (5), “c” é a posição do centroide, e I o momento de inércia da seção transversal.

Outra forma de obter as tensões de flexão na viga é através das Eq. (7), usando-se o momento de resistência W, obtido pela Eq. (8).

$$\sigma_f = \frac{M}{W} \quad (7)$$

$$W = \frac{I}{c} \quad (8)$$

De forma semelhante, a verificação para o cisalhamento do perfil é feito pela Eq. (9), onde V trata-se da força cortante (força concentrada), e “A<sub>alma</sub>” a área da alma do perfil, que será o produto entre a altura da viga e a espessura da alma.

$$\tau = \frac{V}{A_{alma}} \quad (9)$$

## 2.4 Software usado para análise estrutural

O software usado para a análise estrutural via simulação foi o SolidWorks, na versão educacional estudantil, a versão usada permite a criação de malha inteligentes que facilite melhor otimização dos processos de simulação e rapidez na navegação (solidWorks, 2020).

## 2.5 Acessórios de fixação e cargas

Como a viga de calagem estará apoiada sobre ressaltos de concreto (Fig. 1) e articulada por meio de pinos que permitem a rotação da viga metálica, então na simulação, foram considerados a fixação do tipo rolagem com deslizamento na região de apoio sobre o concreto e rotação sobre a região em contato com o pino, conforme a Fig. 6(a) evidencia.

De mesma forma, a força aplicada sobre a viga que é correspondente a força peso do conjunto total (dividido por dois devido ao uso de duas vigas por comporta), foi aplicada na região de posicionamento do patim da comporta, que é aproximadamente  $\frac{1}{3}$  da distância para um dos apoios, como mostra a Fig. 6(b).

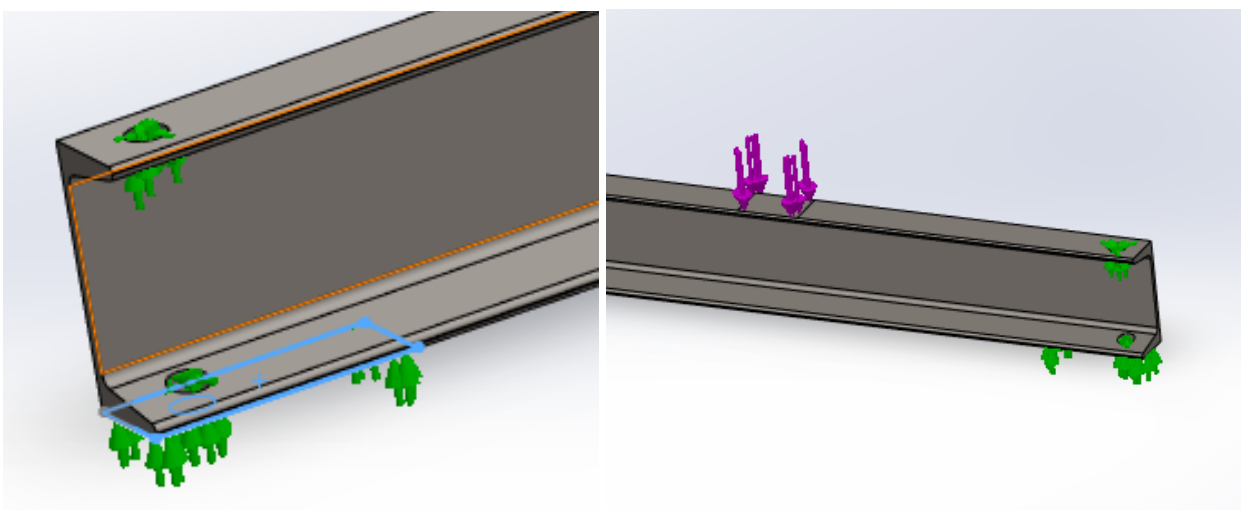


Figura 6. Considerações. (a) fixação na região de apoio com o concreto e com o pino e (b) ponto de aplicação da força.

Como uma maneira de garantir que a malha obtenha resultados coerentes, foi adotado um método de calcular a convergência da malha. Esse método consiste em mudar o número de elementos presentes na malha, colher os valores de tensão e coeficiente de segurança por fadiga e compará-los.

A malha converge quando os valores analisados tendem a convergir em um valor constante. Montando um gráfico que representa a variação da tensão e do coeficiente de segurança por fadiga ao longo do aumento dos elementos, sabe-se que a malha converge quando a curva tende a reduzir seu coeficiente de curvatura, se aproximando de um valor constante.

Para a análise estrutural, como o filete possui muitos elementos, esse método de convergência foi utilizado para identificar se os tamanhos das malhas seriam ideais.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para desenvolvimento do dispositivo de calagem, partiu-se de uma ideia preliminar capaz de solucionar a problemática existente da falta de estocagem dos painéis inferiores das comportas da barragem de Oiticica, onde se considerou como material o aço ASTM A36.

Para os cálculos estruturais, recorreu-se à consideração de uma viga bi-apoiada, tendo em vista que apesar da comporta ficar suspensa em uma abertura de descida, nas laterais da abertura existirão apoios parafusados, de forma que a consideração da Fig. 4 é aceitável.

Para o cálculo da força concentrada através da Eq. (1), a força peso a ser considerada seguiu os seguintes parâmetros: Não foi considerado o peso total da comporta como mostrado na Tab. 1, pois apenas um painel ficará suspenso, nesse caso, considerou-se apenas o peso do painel que é de 1550 kg; apesar da viga pescadora ser um elemento que não ficará estocado junto à comporta, o peso deste também foi considerado nos cálculos, como critério de segurança de movimentação, sendo ela de 426 kg; o peso do patim já foi inserido no peso da comporta por ser um componente pertencente a esta.

Desta forma o peso total considerado para os cálculos foi de 1976 kg, correspondendo a somatória de forças totais verticais a ficarem estocadas na calagem. Foi considerado um coeficiente de impacto de 20%, pois na descida dos equipamentos através da talha elétrica, pode ocorrer um impacto, desta forma, esta consideração torna os cálculos mais seguros. A força total concentrada na posição do patim sobre a viga de calagem calculada pela Eq. (1) foi de 11618,88 N.

Assim, fazendo-se uso da Eq. (5) é possível chegar a um momento fletor de 2556,1536 N.m considerando a distância L (entre apoios) como sendo de 88 centímetros.

O momento de inércia W foi calculado através da Eq. (8), para o perfil mostrado na Fig. 3, correspondeu a 0,03113 mm<sup>3</sup>. Com isso, o valor da tensão de flexão para a viga de calagem, é o momento fletor dividido pelo momento de inércia, chegando-se a um valor final de 82,11 MPa.

Como a tensão de flexão está abaixo da tensão de escoamento do material (150 Mpa) e da tensão admissível (166,7 MPa), então a viga de calagem suportaria estruturalmente com folga.

No cálculo da tensão de cisalhamento máxima seguindo a Eq. (9), a força cortante corresponde a força concentrada de 11618,88 N calculada anteriormente e a área da alma (produto entre a altura da viga e a espessura da alma), será de 464,312 mm<sup>2</sup>, referente a seção da viga de 4,57 mm x 101,6 mm, como visto na Fig. 3. A tensão de cisalhamento média na área da seção transversal da alma da viga é de 25,02 MPa, valor este também inferior a tensão de cisalhamento admissível do material.

No caso da análise computacional, realizando a metodologia relacionada aos acessórios de fixação e cargas aplicadas, a malha usada foi a ilustrada na Tab. 2.

Foram usados 1.403.587 elementos que corresponde a um número elevado, além do tamanho dos elementos serem reduzidos de forma a favorecer os corretos resultados, mesmo considerando uma viga de pequenas dimensões. Tal postura requer mais do computador, mas não necessitou de uma análise de 245 da malha usada.

Diferentemente do Ansys, o Solidworks não permite a escolha do tipo de malha a ser usado, por isso, usou-se a pré-definida pelo software, alterando-se apenas as propriedades dos elementos de forma coerente com a necessidade de aplicação, como pôde ser observado nas considerações de Bezerra, *et al.*, 2020.

Tabela 2. Informações da malha usada

Tipo de malha	Malha sólida padrão
Total de nós	293289
Total de elementos	1403587
Proporção máxima	5,4651
% de elementos com Proporção < 3	99,9
Porcentagem de elementos com Proporção > 10	0
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss):	00:10:28

O resultado da aplicação dos parâmetros mostrados na simulação seguindo o critério de Von mises, está mostrado na Fig. 7.

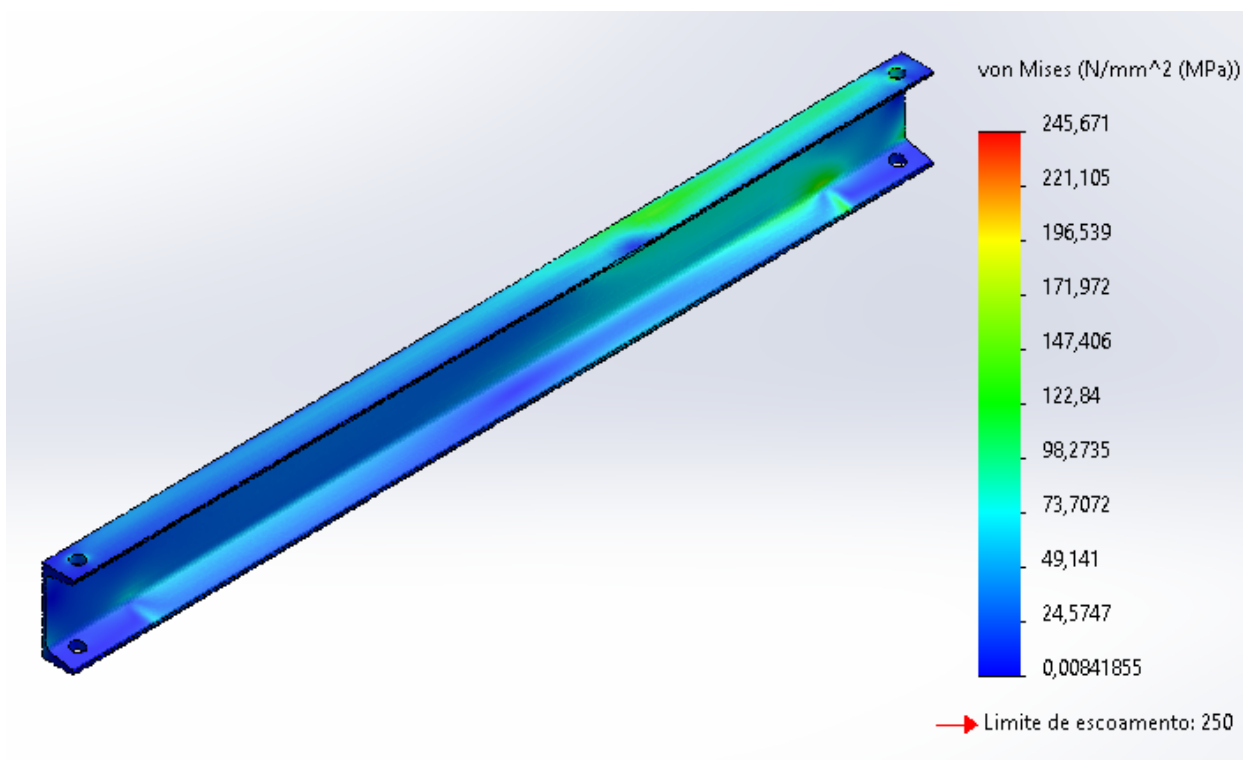


Figura 7. Tensão de Von Mises sobre a viga de calagem.

A maior tensão atuante sobre a viga está localizada próximo ao apoio de concreto e na região de contato do patim das comportas com a viga, fato este ocasionado devido a concentração de tensão do contato.

A maior tensão observada pela cor verde está em torno de 150 Mpa, que se apresenta como um valor inferior ao limite de escoamento do material utilizado, como mostrado na legenda lateral, não sendo um ponto de preocupação estrutural.

Na região central as tensões ilustradas pela simulação comprovam uma pequena relação com os cálculos de flambagem, uma vez que foram próximos dos valores analíticos (82 Mpa) e teoricamente o centro da viga é a região que mais sofre com o efeito do momento fletor.

A divergência existente pode conter relação com a malha escolhida, ou mesmo com a somatória de outros efeitos que não foram considerados nos cálculos analíticos.

Portanto, o perfil “U” de dimensões 4” x 1.5/8” x 3/16” x 1090 mm pode ser considerado seguro diante da simulação computacional resultante.

Devido ao uso destas pequenas espessuras, recomenda-se a aplicação de tratamento térmico do material e uso de uma pintura apropriada, para evitar futuras corrosões e desgaste abrasivo devido a movimentação dos painéis.

Muito embora os resultados estruturais mostram uma segurança de uso do equipamento, é importante que sejam realizados todos os cuidados possíveis relacionados à fabricação, transporte, manutenção e funcionamento da viga de calagem, dado a sua grande importância para a barragem. O equipamento deve ser examinado quanto a deterioração, corrosão, folga, desgaste ou peças quebradas

#### **4. CONCLUSÕES**

A análise realizada foi de importância considerando que as pequenas espessuras utilizadas na seção da viga de calagem foram questionadas no quesito estrutural.

Nos cálculos demonstrados, foram consideradas as situações mais críticas, de forma a prevenir ações não planejadas, favorecendo sobretudo de fato a segurança. A partir dos cálculos de tensão de flexão e cisalhamento para a viga de calagem, foi observado que o sistema apresenta-se seguro estruturalmente para a sua aplicação.

A análise através de simulação numérica para a calagem considerando o efeito da força peso distribuída no local de apoio do patim sobre a viga, confirmou o previsto analiticamente, identificando inclusive através de cores os efeitos das tensões ao longo do elemento analisado.

Recomenda-se o uso de tratamento térmico superficial sobre o material usado, assim como o fortalecimento da pintura a ser utilizada, de forma a coibir uma possível oxidação do perfil com o tempo, além de ser tomados todos os cuidados possíveis quanto a fabricação e manutenção dos elementos.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

O autor agradece a Universidade Federal do Rio Grande do Norte e a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela disponibilização de fontes bibliográficas e acesso às suas dependências.

Agradeço também a Fundação de Amparo e Promoção da Ciência Tecnologia e Inovação do RN pelo apoio financeiro e institucional realizado.

#### **6. REFERÊNCIAS**

- Aracawa, B.H. 2013. Cálculo estrutural de uma comporta ensecadeira. Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade São Francisco.
- Bezerra, A.M.M. 2020. Structural Static Analysis of Academic Rocket Engine Using 6061 Aluminum With AISI 1020 Steel Nozzle. 19th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2020. Bento Gonçalves, RS.
- Erbisti, P.C.F. Comportas Hidráulicas. 2º Edição. s.l. : Interciência/2002.
- Cury, A.A., 2015. Critérios de falha. Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional, Apresentação em slides.
- Hibbeler, R.C., 2010. Resistência dos materiais. 9 Ed. Livro. São Paulo.
- KL Engenharia. 2019. Projeto Executivo da Tomada d’água suplementar da barragem de Oiticica. Volume 1 – Projeto Civil e Hidromecânico. Fortaleza/CE.
- Norton, R.L., 2004. Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada. Porto Alegre : Bookman.
- Shigley, J.E., Budynas, R.G., Nisbett, J.K., 2016. Elementos de Máquinas de Shigley. Porto Alegre. AMGH.
- SolidWorks. 2020. SOLIDWORKS 2020 | Empowering Design Innovation. 14 Jun. 2020 <www.solidworks.com>
- Tundisi, J.G. 2008. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. Estudos Avançados. online. v. 22, n. 63, pp. 7-16. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200002>>.. Acesso em 24 se. 2021.

#### **7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.