

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Gabriel Savage Gomm Monteiro

Análise e Aplicação de Polímero Reforçado em Fibra de Vidro em uma Obra de Arte Especial - Estudo de Caso sobre a Ponte no Trecho de Papanduva

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Civil na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Orientador: Daniel Cardoso
Coorientador: Thiago Andrade

Rio de Janeiro
Dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha gratidão aos meus pais, Karen e Marcelo, pela sólida base familiar, apoio emocional e suporte financeiro que me proporcionaram para alcançar esta conquista. Reconheço a importância fundamental do respaldo dessas figuras significativas em minha jornada e serei eternamente grato pela confiança depositada em meu potencial. Dedico meu agradecimento a minha irmã, Isabella, e meus primos Bernardo, Clara, David, Victor e Marina por contribuírem para o engrandecimento da família e proporcionar um refúgio para momentos de dúvida e indecisão durante toda minha formação acadêmica e pessoal.

Além disso, agradeço ao meu orientador e coorientador, Daniel Cardoso e Thiago Andrade, por disponibilizarem o material e o conhecimento necessário para o desenvolvimento deste trabalho. Se mostraram sempre dispostos para atenderem minhas dificuldades e incertezas sobre as etapas do curso e a me apresentarem o novo mundo da construção civil que os PRFs apresentam.

Aos colegas da Casagrande Engenharia, que contribuíram para a formação da base de conhecimento que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho, assim como a disponibilidade dos softwares necessários para a criação do modelo de cálculo, este trabalho não seria possível sem vocês.

RESUMO

O polímero reforçado com fibras de vidro é um material compósito que consiste no reforço de fibras em uma matriz polimérica e atualmente é empregado na engenharia civil como uma possível substituto para as barras de aço. Este trabalho desenvolve um estudo de caso de uso do polímero revestido em fibra de vidro (PRFV) em um tabuleiro de uma obra de arte especial. O objetivo foi verificar as diferentes aplicabilidades do material e como este se comporta em uma estrutura de grande porte. Para o estudo de caso, foi utilizado o projeto da ponte no trecho de Papanduva, no km 51+820 da BR-116 em Santa Catarina, elaborado pela Casagrande Engenharia e Consultoria. Foi desenvolvido um modelo de cálculo em um software de elemento finitos, CSI SAP2000, para determinar os esforços críticos na ponte e realizar o dimensionamento da armadura em PRFV. O estudo foi baseado no progresso da CE-002:124.026 – Comissão de Estudo Estruturas de concreto reforçado com fibras, que está sendo responsável pela elaboração da norma para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), assim como a norma americana ACI 440.1R-15. Com o intuito de seguir as determinações da comissão, foram calculadas as principais verificações para o uso do PRFV para esforço de momento fletor, cortante, fissuração e flecha.

Palavras chaves: Polímero revestido com Fibra de Vidro. PRFV. Papanduva.

ABSTRACT

The glass fiber-reinforced polymer is a composite material consisting of fiber reinforcement in a polymeric matrix and has been introduced to the field of civil engineering as a potential substitute for steel bars. This work develops a case study on the use of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) in the deck of a bridge. The objective was to assess the various applications of the material and its performance in a large-scale structure. For the case study, the existing project of a bridge at the Papanduva section, at km 51+820 of the federal road BR-116 in Santa Catarina, was utilized. A calculation model was developed using finite element analysis software, CSI SAP2000, to determine critical forces in the bridge and to design the GFRP reinforcement. The study was based on the progress of CE-002:124.026 – Study Committee on Fiber-Reinforced Concrete Structures, responsible for developing the standard for the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT), as well as the American standard ACI 440.1R-15. In order to comply with regulatory requirements, the main verifications for the use of GFRP were calculated for flexural moment, shear, cracking, and deflection.

Keywords: Glass fiber-reinforced polymer. GFRP. Papanduva.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	9
1.2. OBJETIVO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. PROPRIEDADES DO MATERIAL	11
2.2. FABRICAÇÃO DO MATERIAL	14
2.3. COMPARATIVO COM O AÇO	15
2.4. NORMAS UTILIZADAS	17
2.5. METODOLOGIA DE CÁLCULO.....	18
2.5.1. ARMADURAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS.....	18
2.5.2. ESFORÇO CORTANTE	21
2.5.3. FISSURAÇÃO	23
2.5.4. FLECHA	24
3. ESTUDO DE CASO	26
3.1. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	26
3.2. PREMISSAS DE PROJETO.....	29
3.2.1. MATERIAIS.....	29
3.3. METODOLOGIA DE ANÁLISE ESTRUTURAL	29
3.3.1. MODELO COMPUTACIONAL	30
3.3.2. CARGAS CONSIDERADAS	32
3.3.2.1. CARGAS PERMANENTES.....	32
3.3.2.2. CARGAS VARIÁVEIS	34
3.3.2.3. CARGAS EXCEPCIONAIS.....	35
3.3.3. COMBINAÇÃO DE AÇÕES.....	36
3.3.4. ESFORÇOS SOLICITANTES	37
3.3.4.1. ESTADO LIMITE ÚLTIMO	37
3.3.4.1.1. MOMENTO FLETOR	38
3.3.4.1.2. CORTANTE	40
3.3.4.2. ESTADO LIMITE DE SERVIÇO	41
3.3.4.2.1. MOMENTO FLETOR	41
3.4. DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA.....	43
3.4.1. ARMADURAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS.....	43
3.4.2. VERIFICAÇÃO PARA ESFORÇO CORTANTE	47
3.4.3. VERIFICAÇÃO DE FISSURAÇÃO.....	49

3.4.4.	VERIFICAÇÃO DE FLECHA.....	51
4.	CONCLUSÃO.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Ponte sobre o rio Tigrovaya na Rússia	10
Figura 2.1 - Barras de PRFC e PRFV	12
Figura 2.2 - Comportamento de barras PRF em ensaios de tração direta	13
Figura 2.3 - Processo de Fabricação de Barras de PRFV	14
Figura 3.1 - Visão em Planta (Lançamento).....	27
Figura 3.2 – Corte Longitudinal (Lançamento).....	27
Figura 3.3 – Vista em Planta (Geometria).....	28
Figura 3.4 – Corte Longitudinal (Geometria).....	28
Figura 3.5 – Seção Transversal (Geometria).....	28
Figura 3.6 – Modelo de computacional analítico e extrudado – Software SAP2000 .	30
Figura 3.7 – Modelo de cálculo - Vista Superior – Software SAP2000.....	31
Figura 3.8 – Modelo de cálculo - Vista Lateral –Software SAP2000	31
Figura 3.9 - Aplicação do Carregamento de Barreiras Rígidas	32
Figura 3.10 - Aplicação do Carregamento de Recapeamento e Pavimentação.....	33
Figura 3.11 - Aplicação do Carregamento de Empuxo de Terra	33
Figura 3.12 - Aplicação do Carregamento de TB45 (Carga na Laje)	35
Figura 3.12 - Aplicação do Carregamento de TB45 (Carga do Veículo)	35
Figura 3.13 - Md,+max [kNm/m] (Direção Transversal - ELU)	38
Figura 3.14 - Md,-mín [kNm/m] (Direção Transversal - ELU).....	38
Figura 3.15 - Md,+max [kNm/m] (Direção Longitudinal - ELU).....	39
Figura 3.16 - Md,-min [kNm/m] (Direção Longitudinal - ELU).....	39
Figura 3.17 - Vd+max [kN/m]	40
Figura 3.18 - Vd-min [kN/m]	40
Figura 3.19 - Ms,max [kNm/m] (Direção Transversal - ELS).....	41
Figura 3.20 - Ms,min [kNm/m] (Direção Transversal - ELS).....	42
Figura 3.21 - Ms,max [kNm/m] (Direção Longitudinal - ELS)	42
Figura 3.22 - Ms,min [kNm/m] (Direção Longitudinal - ELS)	43
Figura 3.23 - Flecha Máxima na Seção Equivalente	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades de Barras de PRF	12
Tabela 2.2 - Vantagens e Desvantagens do uso de PRF	13
Tabela 2.3 - Peso Específico das Barras de Reforço no Concreto	15
Tabela 2.4 - Propriedades Típicas de Barras de Reforço	16
Tabela 2.5 - Coeficiente de Expansão Termal	16
Tabela 2.6 - Limites para Deslocamento (Tabela 13.3 da Norma 6118:2023)	25
Tabela 3.1 - Momentos Fletores Críticos no ELU.....	44
Tabela 3.2 - Propriedades do PRFV	44
Tabela 3.3 - Uso do γ_{FRP} pela indicação da CE-002:124.026	44
Tabela 3.4 - Esforços Cortantes Críticos no ELU.....	47
Tabela 3.5 - Momentos Fletores Críticos no ELS.....	49
Tabela 3.6 - Classe de Agressividade Ambiental para Limite de Fissuração.....	50
Tabela 3.7 - Valores do Coeficiente ξ_t em função do tempo	53

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A prática de desenvolver novos materiais para a otimização e eficiência dos elementos estruturais sempre fez parte do desenvolvimento científico na engenharia. O concreto armado, que é amplamente utilizado em todo mundo, parte da associação conjunta do concreto, que possui grande resistência a compressão, com o aço, que suporta elevados esforços de tração. Essa união revolucionou o mercado da construção civil e levou a comunidade acadêmica a ampliar seus estudos para a pesquisa de novos compósitos possíveis, com o intuito de viabilizar um aprimoramento no processo construtivo e qualidade dos materiais, como o polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV).

O PRFV consiste em uma matriz de resina polimérica reforçada com fibras de vidro e demonstrou ser uma alternativa viável e eficaz às tradicionais barras de aço em diversas aplicações de engenharia civil. Inicialmente, o PRFV foi desenvolvido para atender à crescente necessidade do mercado de engenharia aeroespacial que não tinha suas demandas supridas pelos materiais tradicionais. A partir dessa aplicação, foi observado pela comunidade internacional a sua capacidade do seu uso para a construção civil em uma ampla gama de infraestruturas, incluindo pontes, edifícios, túneis e outras estruturas civis [1]. A partir desse passo, foram desenvolvidas normas de uniformização e fabricação do material e seu uso foi ampliado ao redor do mundo.

A evolução do emprego de barras de polímero revestido com fibra de vidro na engenharia civil tem sido marcada por descobertas que revelam vantagens substanciais sobre as tradicionais barras de aço. A leveza inerente ao PRFV leva propriedades que otimizam as fases de transporte, instalação e, conseqüentemente, resultam na redução do peso total das estruturas. Este atributo não apenas simplifica a logística associada à implementação desses elementos, mas também culmina em benefícios tangíveis para a integridade estrutural.

A notável resistência à corrosão do PRFV constitui um fator preponderante, especialmente em ambientes marítimos e locais com elevada umidade, onde as barras de aço convencionais seriam suscetíveis a processos de degradação prematura. Adicionalmente, a durabilidade estendida do PRFV, com uma vida útil superior às barras de aço tradicionais, insere-se como um diferencial crítico. Estas

características fundamentais posicionam o PRFV como um substituto eficaz para o aço no contexto do concreto armado, promovendo um panorama diversificado de aplicações na engenharia civil.

A tendência global de implementação do PRFV na construção civil é evidenciada pela sua adoção em diversos países ao redor do mundo. Na Europa, por exemplo, países como Alemanha, França e Reino Unido têm explorado ativamente as aplicações do PRFV em projetos de grande escala. O mesmo ocorre na Ásia, com nações como Japão e China incorporando cada vez mais esse material em suas infraestruturas. Algumas obras famosas ilustram de forma concreta a eficácia e versatilidade do PRFV na engenharia civil. O exemplo notável da Ponte sobre o rio Tigrovaya na Rússia (Figura 1.1) [10], mostra o caso de ponte construída em 1981 que manteve suas propriedades físicas após 41 anos de operação. A ponte foi construída com suas longarinas protendidas com armaduras de PRFV e mostram a capacidade durável no material com o passar do tempo.



Figura 1.1 - Ponte sobre o rio Tigrovaya na Rússia

Em resumo, a implementação do PRFV na construção civil tem sido uma tendência global que trouxe inúmeras vantagens em termos de peso, resistência e durabilidade das estruturas. É importante, também, equilibrar essas vantagens com considerações ambientais, uma vez que a produção e o descarte do material podem ter impactos ecológicos significativos. Portanto, o uso responsável e a pesquisa contínua são fundamentais para maximizar os benefícios do PRFV na indústria da construção civil.

1.2. OBJETIVO

O objetivo se mostra através de um estudo de caso de utilização de PRFV como substituto de barras de aço para construção de uma ponte em galeria em Santa Catarina e, conseqüentemente, propagar o uso de materiais mais sustentáveis em prol do meio ambiente e dos usuários. Para isto, foi dimensionada a ponte do trecho de Papanduva considerando as verificações para momento fletor, esforço cortante, fissuração e flecha.

Esse trabalho apresenta a metodologia desenvolvida pela CE-002:124.026 – Comissão de Estudo Estruturas de concreto reforçado com fibras para dimensionamento de estruturas em polímero revestido em fibra de vidro. São apresentadas as principais propriedades do material, qualidades, comparativos com barras de aço e aplicabilidades na construção civil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROPRIEDADES DO MATERIAL

O polímero reforçado com fibras (PRF) é um material compósito que consiste no uso de fibras como reforço de uma matriz polimérica. Esses materiais que, antes de serem unidos em um único elemento, não possuem capacidade de uso estrutural de forma individual, se mostram extremamente capazes de resistirem à grandes esforços quando unidos. As fibras são responsáveis pela resistência a tensão axial enquanto o polímero mantém o material aglutinado, de forma que se mostra como um material extremamente útil e de prática fabricação.

Com o passar dos anos e a evolução do estudo da ciência dos materiais, foram desenvolvidas diferentes fibras que podem ser utilizadas em conjunto com a matriz polimérica, todas com suas qualidades e aplicabilidades diferentes. Existe uma grande gama de fibras que podem ser utilizadas embutidas no polímero, porém as mais difundidas são de basalto (PRFB), carbono (PRFC), vidro (PRFV) e aramida (PRFA) como indica a Figura 2.1.[11]



Figura 2.1 - Barras de PRFC e PRFV

Para o caso da fibra de vidro, esta consiste principalmente de sílica e é classificada em três categorias principais: E-Glass, S-Glass e AR-Glass, cada uma com sua peculiaridade. A E-Glass possui alto isolamento elétrico e baixa suscetibilidade à umidade. A S-Glass possui alta resistência a tração e módulo de elasticidade e a AR-Glass possui alta resistência ao ataque de álcali [4]. A Tabela 2.1, com dados extraídos de [2] e [3], apresenta as principais características entre as propriedades dos PRF.

Tabela 2.1 - Propriedades de Barras de PRF

<i>Característica</i>	<i>PRFC</i>	<i>PRFV</i>	<i>PRFA</i>
<i>Limite de resistência à tração (MPa)</i>	600 – 3000	400 – 1600	600 - 2500
<i>Módulo de elasticidade – E (GPa)</i>	80 – 500	30 - 60	30 - 125
<i>Deformação de ruptura (%)</i>	0,5 – 1,8	1,2 – 3,7	1,8 – 4,0

Quanto ao comportamento mecânico sob tração, é perceptível que as barras possuem diferenças de acordo com o material, mostrando que o PRFV possui o menor módulo de elasticidade, como indica a Figura 2.2. [3]. Considerando que o Módulo de Elasticidade do aço é de 200 GPa, é nítido que os PRF se mostram como materiais mais frágeis. Para o caso do PRFV, pode ser feita a comparação e calculado um módulo de elasticidade que representa por volta de 15% do módulo do aço. Essa característica leva a uma ruptura mais brusca da estrutura, já que seu processo de escoamento ocorre com maior rapidez.

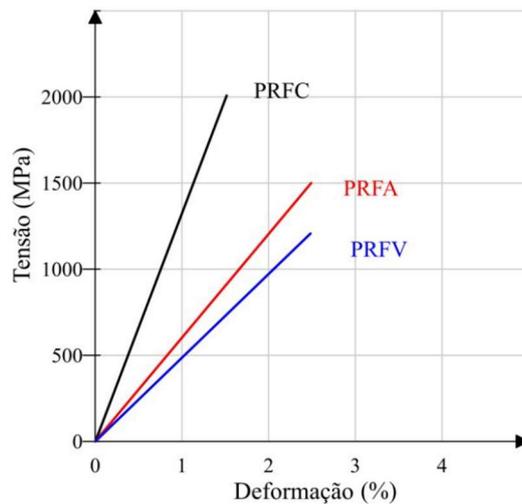


Figura 2.2 - Comportamento de barras PRF em ensaios de tração direta

Ao final, as qualidades e desvantagens dos reforços em PRF foram apresentadas na Tabela 2.2. [6]

Tabela 2.2 - Vantagens e Desvantagens do uso de PRF

Vantagens	Desvantagens
Alta resistência à tração longitudinal	Não escoam antes da ruptura frágil
Resistência a corrosão (independe do revestimento)	Baixa resistência transversal
Não magnético	Baixo módulo de elasticidade
Alta tolerância a fadiga	Susceptibilidade a danos para resinas poliméricas e fibras sob exposição de radiação violeta
Baixo peso específico	Alto coeficiente de expansão térmica perpendicular às fibras devido ao concreto
Baixa condutividade térmica e elétrica	Susceptível ao fogo, dependendo do tipo de matriz e do cobrimento
	Baixa durabilidade das fibras de vidro em ambiente úmido
	Baixa durabilidade de algumas fibras em ambiente alcalino

2.2. FABRICAÇÃO DO MATERIAL

A fabricação do PRFV parte de um processo denominado pultrusão, que consiste na impregnação de um conjunto de fibras por uma matriz polimérica. A barra é continuamente puxada por um tracionador que molda o perfil na geometria desejada. [5]. Para o caso das fibras de vidro, estas são conjuntas em agrupamento de fios e mergulhadas por um banho de resina onde o material é impregnado com uma resina termofixa líquida.

As fibras são primeiro guiadas por um molde metálico que define o tamanho da barra final e, em seguida, entram em um forno de cura. Antes de entrar no forno, são aplicados tratamentos superficiais, como uma camada de areia e envoltórios helicoidais na superfície da barra. Dentro do forno, a resina passa pelo processo de solidificação e se torna rígida com sua geometria determinada pelo perfil. Ao final, a barra é tracionada continuamente até a determinação de seu comprimento estabelecido como mostra a Figura 2.3. [1]

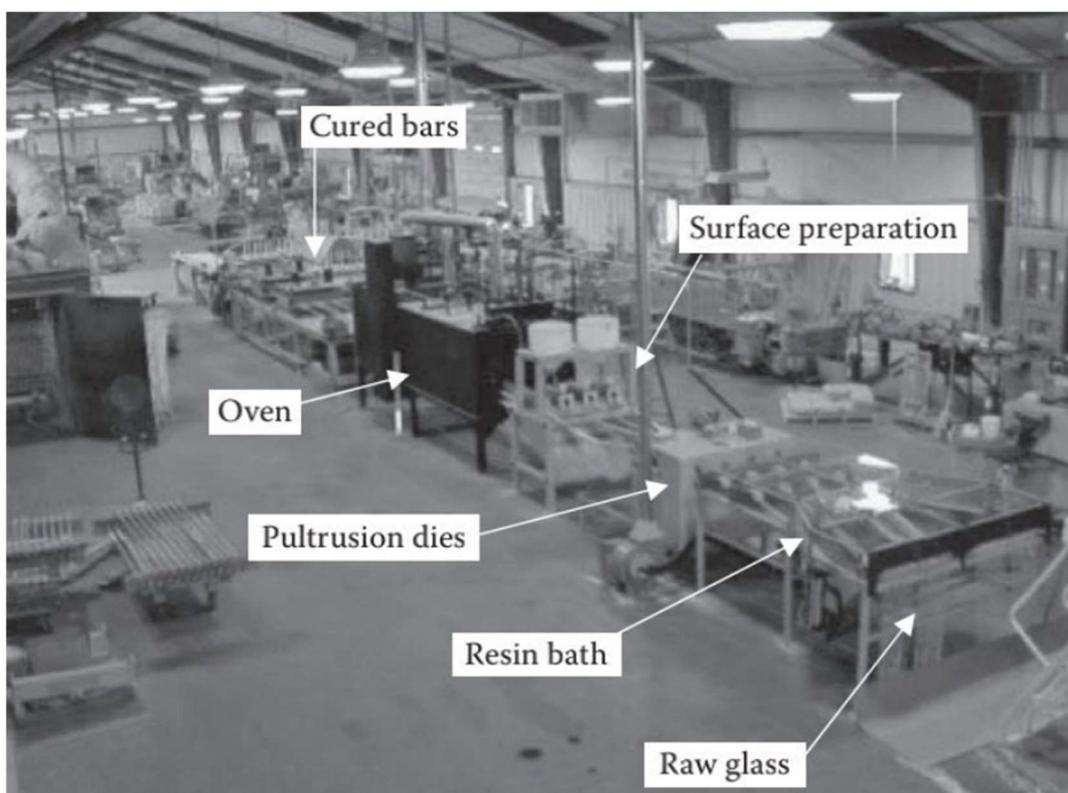


Figura 2.3 - Processo de Fabricação de Barras de PRFV

A pultrusão pode produzir perfis ocos ou maciços, e se destaca pela sua capacidade de manter uma produção contínua, que mantém as propriedades da barra fabricada homogêneas, possui baixa perda de materiais com requisitos baixos de mão de obra. [6] Todas estas qualidades sobressaem as da produção do aço, que é um material conhecido por gerar grandes problemáticas ambientais.

Como é feito através de um processo químico e em altas temperaturas, o controle de qualidade do aço se torna mais complexo do que o método de pultrusão em fibras de vidro, fora o grande gasto energético e emissões de carbono necessários para o todo o processo de fabricação das barras. Quanto ao seu transporte e armazenamento, é necessário um constante controle de umidade e contato com salinidade, que pode levar a corrosão e inutilizar o material. [12]

2.3. COMPARATIVO COM O AÇO

O polímero revestido com fibra de vidro possui infinitas aplicabilidades no mundo da construção civil, mas seu principal propósito tem se mostrado como uma possível alternativa para o uso das barras de aço no concreto armado. Inicialmente, é possível observar a diferença de peso entre os dois materiais. Os PRF chegam a possuir um peso específico de até 15% das barras de aço, como mostra a Tabela 2.3 elaborada pela norma americana ACI 440.1R-15 abaixo: [2]

<i>Peso específico (g/cm³)</i>			
<i>Aço</i>	PRFV	PRFC	PRFA
7,9	1,25 – 2,10	1,50 – 1,60	1,24 – 1,40

Tabela 2.3 - Peso Específico das Barras de Reforço no Concreto

Além disso, é possível comparar outras propriedades entre o aço e os polímeros reforçados em fibra através da Tabela 2.4:

	Aço	PRFV	PRFC	PRFA
Tensão de escoamento nominal (MPa)	276 – 517	NA	NA	NA
Resistência à tração (MPa)	483 – 1600	483 – 690	600 – 3690	1720 - 2540
Módulo de Elasticidade (GPa)	200	35 – 51	120 - 580	41 - 125
Tensão de Ruptura (%)	6,0 – 12,0	1,2 – 3,1	0,5 – 1,7	1,9 – 4,4

Tabela 2.4 - Propriedades Típicas de Barras de Reforço

Apesar de possuir uma resistência à tração superior à do aço, o PRFV se mostra como um material com baixo módulo de elasticidade e de comportamento frágil, i.e. sem patamar de escoamento. A ductilidade é uma importante característica que o aço leva para escoar antes de sua ruptura, enquanto as fibras de vidro levam a uma ruptura mais brusca. Esse escoamento é importante para que redistribuição de esforços das estruturas e para que a mesma forneça um aviso prévio antes da ruptura, indicando uma possível problemática que necessite de uma perícia mais aprofundada.

Na Tabela 2.5, pode ser analisado os coeficientes de temperatura do aço e dos FRPs. Pode ser observado, então, que o PRFV possui um coeficiente de temperatura similar ao do concreto, de forma que suas deformações sejam congruentes quando aplicados em uma mesma estrutura. Em ambientes de grandes amplitudes térmicas, o PRFV pode demonstrar um coeficiente de expansão termal similar ao do concreto de quase metade do aço na direção longitudinal, o que reduziria a tensão interna provocada substancialmente.

Tabela 2.5 - Coeficiente de Expansão Termal

Direção	CTE ($\times 10^6 / ^\circ C$)				
	Aço	PRFV	PRFC	PRFA	Concreto
Longitudinal (α_L)	11,7	6,0...10,0	-9,0...0,0	-6...-2	7,2...10,8
Transversal (α_T)	11,7	21...23	74...104	60...80	7,2...10,8

2.4. NORMAS UTILIZADAS

Com o intuito de promover o uso de polímeros revestidos com fibra de vidro, instituições de referência internacional elaboraram normas técnicas de dimensionamento construção e aplicabilidade deste material na engenharia civil. Estas normas servem de referência para garantir a segurança, padrão de qualidade e facilidade de uso do material em todo o mundo. Neste contexto, diferentes normas de cálculo são empregadas para garantir a segurança e eficácia desses sistemas, com ênfase na CSA S806-12 e ACI 440.1R-15.

A norma CSA S806-12, desenvolvida pelo *Canadian Standards Association*, é amplamente reconhecida no Canadá para o projeto e a construção de estruturas reforçadas com PRFV. Por sua vez, a ACI 440.1R-15 é uma norma emitida pelo American Concrete Institute (ACI) e é amplamente adotada nos Estados Unidos e em outros países. Esta norma aborda aspectos relacionados à análise estrutural, projeto e dimensionamento de elementos reforçados com PRFV, considerando fatores como resistência à tração, aderência, deformação e condições de serviço e estabelece critérios rigorosos para a seleção dos materiais, métodos de instalação e ensaios de qualidade para garantir o desempenho satisfatório das estruturas reforçadas com PRFV.

Elas abordam diretrizes específicas para o uso de PRFV em sistemas de reforço interno de estruturas de concreto e é amplamente utilizada como referência para novos estudos de desenvolvimento do uso de PRF no Brasil e no resto do mundo. A partir do estudo dessas normas, a CE-002:124.026 – Comissão de Estudo Estruturas de concreto reforçado com fibras (ABNT), está sendo desenvolvida para viabilizar o uso de PRF no Brasil com nossa própria norma técnica. O desenvolvimento do estudo de caso da OAE (obra de arte especial) no trecho de Papanduva foi realizado a partir dessa norma.

2.5. METODOLOGIA DE CÁLCULO

Para o cálculo da armadura e verificação estrutural da ponte sobre o trecho em Papanduva, foram utilizados os esforços determinados no modelo de cálculo computacional e o projeto de estruturas de concreto armado com barras de PRF que está em processo de desenvolvimento na CE-002:124.026 – Comissão de Estudo Estruturas de concreto reforçado com fibras (Versão de outubro/2023) . A partir das considerações das propriedades do polímero revestido em fibra de vidro, é esperado que seu dimensionamento seja controlado pelas verificações de estado limite de serviço (fissuração e flecha) devido a sua ductilidade e resistência. Dessa forma, as considerações foram feitas de acordo com os atendimentos da comissão normativos:

2.5.1. ARMADURAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS

A partir da comissão de estudos citada, determina-se a taxa ρ_{fb} que indica o ponto de transição entre os modos de falha de ruptura da armadura e rompimento da barra de FRP:

$$\rho_{fb} = \lambda \alpha_c \frac{f_{cd}}{f_{fd}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fd}}$$

Onde,

ε_{cu} é a deformação última do concreto à compressão;

E_f é o módulo de elasticidade à tração da armadura de FRP;

f_{fd} é a resistência à tração de cálculo da armadura de FRP;

f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto.

C_E é o coeficiente de redução ambiental, que pode ser tomado como 0,85.

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_f}$$

$$f_{fd} = C_E \frac{f_{fk}}{\gamma_{FRP}}$$

Para o caso de ruptura por rompimento das barras de FRP, utiliza-se $\rho_f \leq \rho_{fb}$.

$$x = \begin{cases} \frac{f_{fd}A_f}{\lambda\alpha_c f_{cd}b}, & \rho_f \leq \rho_{fb} \\ \frac{1}{2b} \frac{\varepsilon_{cu}A_f E_f}{\lambda\alpha_c f_{cd}} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda\alpha_c f_{cd}}{\varepsilon_{cu}A_f E_f} bd} \right), & \rho_f > \rho_{fb} \end{cases}$$

Onde,

ρ_f é a taxa de armadura à flexão;

A_f é a área de armadura de FRP na região de tração efetivamente contribuindo para a resistência;

Após a determinação da linha neutra, deve-se comparar o resultado com o momento resistente (M_{Rd}) que é definido como:

$$M_{Rd} = \sigma_{fd}A_f \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right)$$

Onde,

$$\sigma_{fd} = \begin{cases} f_{fd}, & \rho_f \leq \rho_{fb} \\ \frac{xb\alpha_c\lambda f_{cd}}{A_f}, & \rho_f > \rho_{fb} \end{cases}$$

Determina-se, também, as armaduras mínimas e máximas a serem adotadas. A armadura longitudinal mínima na zona tracionada de elementos submetidos à flexão simples deve ser calculada para que a seção ofereça resistência a um momento solicitante mínimo de cálculo igual a:

$$M_{d,mín} = 1,5 \frac{I_c}{y_t} f_{ctk,sup}$$

Onde,

y_t é a distância da linha neutra da seção bruta à fibra mais tracionada;

I_c é o momento de inércia da seção bruta.

Além disso, calcula-se a taxa de armadura mínima para a seção da laje. Para este cálculo, deve-se comparar o resultado entre a armadura mínima na seção e a armadura mínima sujeitos a deformações impostas tais como temperatura e retração.

Para seções retangulares, o atendimento ao item de momento solicitante mínimo pode ser considerado satisfeito se a taxa de armadura adotada for igual ou superior à taxa mínima definida a seguir:

- Armadura Máxima:

$$A_{f,max} = \rho_{fb} h b$$

- Armadura Mínima:

- Seção da Laje:

$$\rho_{f,min} = 0,3 \frac{f_{ctk,sup}}{f_{fd}}$$

Onde,

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m} \text{ [7]}$$

- Temperatura e Retração:

$$A_{f,min(temp)} = k k_c f_{ctk,sup} \frac{A_{ct}}{\sigma_f}$$

Onde,

k é um coeficiente que leva em conta os mecanismos de geração de tensões, que pode ser tomado como igual a 0,8;

k_c é um coeficiente que leva em conta o tipo de ação e pode ser tomado como igual a 1,0 para tração pura, 0,4 para flexão simples e uma interpolação linear desses dois valores para casos intermediários;

A_{ct} é a área de concreto na zona tracionada.

σ_f é a tensão na armadura de PRF.

Onde,

$$A_{ct} = (h - x)b$$

O σ_f é calculado considerando o limite de fissuração máximo para a seção. Sabendo que o Classe de Agressividade adotada para o estudo de caso em 3.2 é II. O limite de fissuração é calculado em 3.4.3.

A partir do cálculo das armaduras mínimas, é determinado o maior valor para controle da adoção da armadura final. A armadura adotada, então, é utilizada para calcular o momento resistente:

$$M_{Rd} = \sigma_{fd} A_f \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right)$$

Com o valor resistente, é comparado com o valor de momento fletor solicitante do modelo computacional para garantir a segurança da seção.

2.5.2. ESFORÇO CORTANTE

A análise para esforço cortante pode ser feita através das seguintes verificações:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2}$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_f$$

Onde:

V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo na seção;

V_{Rd2} é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto;

$V_{Rd3} = V_c + V_f$ é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal, onde V_c é a parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça e V_f é a parcela resistida pela armadura transversal. Para este caso, foi desconsiderado o uso de armaduras transversais.

- Verificação das diagonais comprimidas:

$$V_{Rd2} = 0,27 \alpha_{v2} f_{cd} b_w d$$

E,

$$\alpha_{v2} = (1 - f_{ck} / 250), \text{ com } f_{ck} \text{ expresso em MPa.}$$

- Verificação das diagonais tracionadas:

$$V_{Rd} = V_c + V_f$$

$$V_c = 0,6 f_{ctd} b_w x_{II}$$

Onde,

b_w é a menor largura da seção, compreendida ao longo da altura útil d ;

x_{II} é a posição da linha neutra no estágio II;

f_{ctd} é a resistência à tração de cálculo do concreto. [7]

E,

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctm}}{1,4}$$

$$x_{II} = \frac{-nA_s + \sqrt{(nA_s)^2 + 2nA_s b d}}{b}$$

Caso o valor de V_c não seja superior a V_{Rd3} , é necessário a adição de estribos (V_f) e estes podem ser calculados por:

$$V_f \geq V_{Sd} - V_c$$

$$V_f = 0,9 d f_{fvd} \left(\frac{A_{ft}}{s} \right)$$

Onde,

A_{ft} é a área da armadura ocupada pelos estribos;

s é o espaçamento entre os estribos;

f_{fvd} é a resistência de cálculo da armadura transversal de FRP definida por:

$$f_{fvd} = \frac{f_{fvk}}{\gamma_f}$$

f_{fvk} é a resistência nominal do estribo, tomada como o menor valor dentre f_{fbk} e $0,5\% E_f$.

E,

$$f_{fbk} = \left(0,05 \frac{r_b}{\phi} + 0,3 \right) f_{fk}$$

Dimensiona-se o estribo para viabilizar $V_{Rd3} = V_c + V_f$, para garantir a segurança quanto ao esforço cortante.

2.5.3. FISSURAÇÃO

A abertura de fissura característica em vigas de concreto armado com barras de FRP pode estimada como:

$$w_k = \frac{2}{E_f} \left[1,5c_{nom} + \frac{1}{4} \frac{f_{ctm}}{\tau_b} \frac{\phi}{\rho_{ef}} \right] \left[\sigma_f - \frac{1}{2} \frac{f_{ctm}}{\rho_{ef}} \left(1 + \frac{E_f}{E_{CS}} \rho_{ef} \right) \right] \geq 0$$

Onde,

σ_f é a tensão de tração na armadura no estágio II, determinada para combinação frequente de ações.

c_{nom} é o cobrimento nominal da armadura;

ϕ é o diâmetro da armadura longitudinal;

τ_b é a tensão de aderência nominal, que pode ser tomada multiplicando-se a resistência de aderência da barra, f_{bd} , por 1,8 e $f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 f_{ctd}$.

$\eta_1 = 1,5$ para barras com revestimento de areia; 1,3 para barras com fios enrolados em espiral ou nervuras superficiais; e 0,7 para barras com reentrâncias no comprimento;

$\eta_2 = 1,0$ para barras em condição de boa aderência e 0,7 para barras em condição de má aderência, conforme itens 9.1.2 e 9.1.3;

$\eta_3 = 1,0$ para barras com diâmetro inferior a 20 mm e 0,8 para barras com diâmetro superior a 20 mm;

$\eta_4 = 1,0$ para barras de GFRP ou BFRP;

f_{ctd} é a resistência à tração de cálculo do concreto, determinada de acordo com a ABNT NBR 6118 [7];

$\rho_{ef} = \frac{A_f}{b h_{ef}}$ é a taxa de armadura efetiva, determinada como a razão entre a área de armadura na zona tracionada, A_f , e a área de concreto efetiva circundante, $b \cdot h_{ef}$. O valor de h_{ef} pode ser obtido como o menor valor dentre $2,5 d'$ e $\frac{h-x_{II}}{3}$, onde d' é a distância entre a face de concreto tracionada e o centro de gravidade da armadura e x_{II} é a profundidade da linha neutra no estágio II.

2.5.4. FLECHA

De forma aproximada, a flecha imediata de elementos lineares de concreto armado com barras de FRP pode ser determinada considerando o módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs}) e empregando o momento de inércia equivalente dado pela expressão a seguir.

$$I_e = \frac{I_{II}}{1 - \gamma \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^2 \left(1 - \frac{I_{II}}{I_c}\right)} \leq I_c$$

Onde,

I_e é o momento de inércia equivalente;

M_a é o momento solicitante na seção crítica, ou seja, na seção mais solicitada do trecho considerado;

I_c é o momento de inércia da área bruta de concreto;

I_{II} é o momento de inércia no estágio II:

$$I_{II} = \frac{b x_{II}^3}{3} + n A_s (d - x_{II})^2$$

γ é um fator de rigidez dependente do carregamento e das condições de contorno, mas que pode ser estimado como:

$$\gamma = 1,7 - 0,7 \left(\frac{M_r}{M_a}\right)$$

M_r é o momento resistente:

$$M_r = 1,5 \frac{I_c}{y_t} f_{ctk,sup}$$

A partir do cálculo do momento de inércia equivalente, é feito o modelo de cálculo com a aplicação da nova propriedade da seção, e comparado o valor máximo de flecha com o limite previsto em norma. [7]

Tabela 2.6 - Limites para Deslocamento (Tabela 13.3 da Norma 6118:2023)

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	ℓ/250
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas variáveis de utilização	ℓ/350
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	ℓ/250 ^a
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	ℓ/350+ contraflecha ^b
			Ocorrido após a construção do piso	ℓ/600
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	ℓ/500 ^c e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	ℓ/250 ^c e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\psi_1 = 0,30$)	$H/1700$ e $H/850^e$ entre pavimentos ^f
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	ℓ/400 ^g e 15 mm

Além disso, deve-se considerar o efeito da flecha diferida no tempo, que é a parcela de flecha devido às ações de longa duração. Para isto, calcula-se a flecha máxima no vão no modelo computacional e a multiplica pelo coeficiente α_f dado por:

$$\alpha_f = \frac{\xi(t) - \xi(t_0)}{1 + 50\rho_s'}$$

Onde,

ξ é um coeficiente determinado em função do tempo, conforme definido na ABNT NBR 6118 para cálculo da flecha diferida; [7]

t é o instante de tempo para o qual se deseja determina a flecha diferida;

t_0 é a idade de aplicação da ação permanente.

ρ_s' é a taxa de armadura de compressão de aço convencional que eventualmente seja adotada; as armaduras de FRP na região comprimida devem ser desprezadas. Ao final, compara-se a flecha calculada com o valor determinado na Tabela 2.6 para garantir a verificação da flecha na OAE.

3. ESTUDO DE CASO

A Obra de Arte Especial que será analisada é uma ponte sobre a BR-116 em Santa Catarina, localizada no km 051+820 e conhecida como o trecho de Papanduva. Essa OAE tem como objetivo disponibilizar o acesso de retorno e acima da rodovia federal. O projeto foi desenvolvido em consórcio pelas empresas Casagrande Engenharia e Consultoria e Sondotécnica Engenharia de Solos e fez parte de um contrato de inúmeros reforços, duplicações de via e alargamentos na rodovia BR-116.

3.1. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A Obra de Arte Especial (OAE) do km 051+820 é uma estrutura do tipo galeria. O tabuleiro é constituído por uma laje única de concreto armado moldada in-loco com vão de 14,8 m e espessura constante de 0,70 m. A seção transversal da obra possui largura constante de 23,77 m e comporta quatro faixas de rolamento de 3,6 m, dois acostamentos com 3,0 m, duas faixas de segurança com 1,0 m, além de duas barreiras New Jersey simples com 0,38 m nas extremidades e uma barreira New Jersey dupla central de 0,61 m.

A mesoestrutura para essa OAE consiste em paredes com 0,60 m de espessura ligadas rigidamente em seu topo com a superestrutura e responsáveis pelo apoio vertical da OAE. Estas paredes possuem também função de contenção do solo atrás da ponte. As cargas são transmitidas ao terreno por meio de uma laje de fundo com 0,50 m de espessura que funciona como elemento de fundação do tipo radier e como travamento inferior das paredes.

Por fim, para complementar a estrutura de contenção, são criadas alas laterais rigidamente ligadas à parede da galeria. Sua estabilidade é garantida através do travamento de ambas as alas pela laje de fundo da galeria.

As figuras a seguir ilustram as características geométricas dessa OAE.

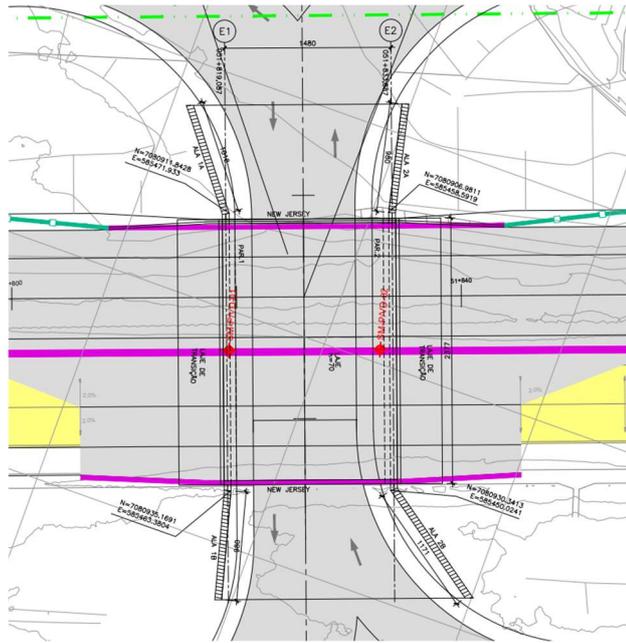


Figura 3.1 - Visão em Planta (Lançamento)

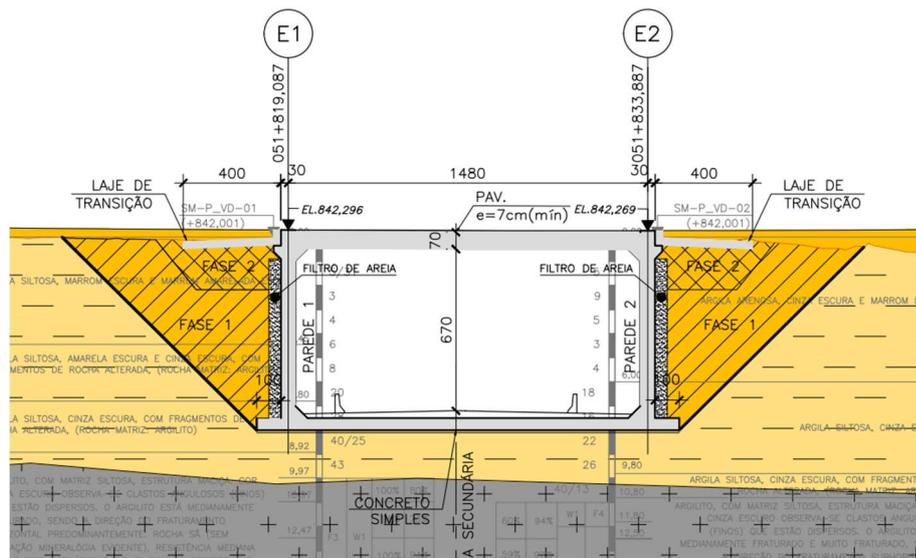


Figura 3.2 - Corte Longitudinal (Lançamento)

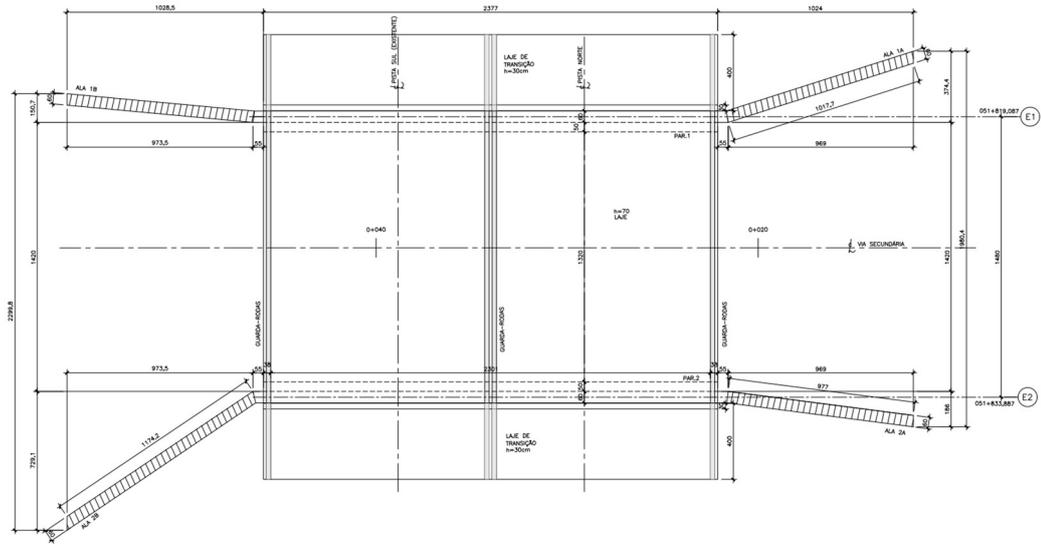


Figura 3.3 – Vista em Planta (Geometria)

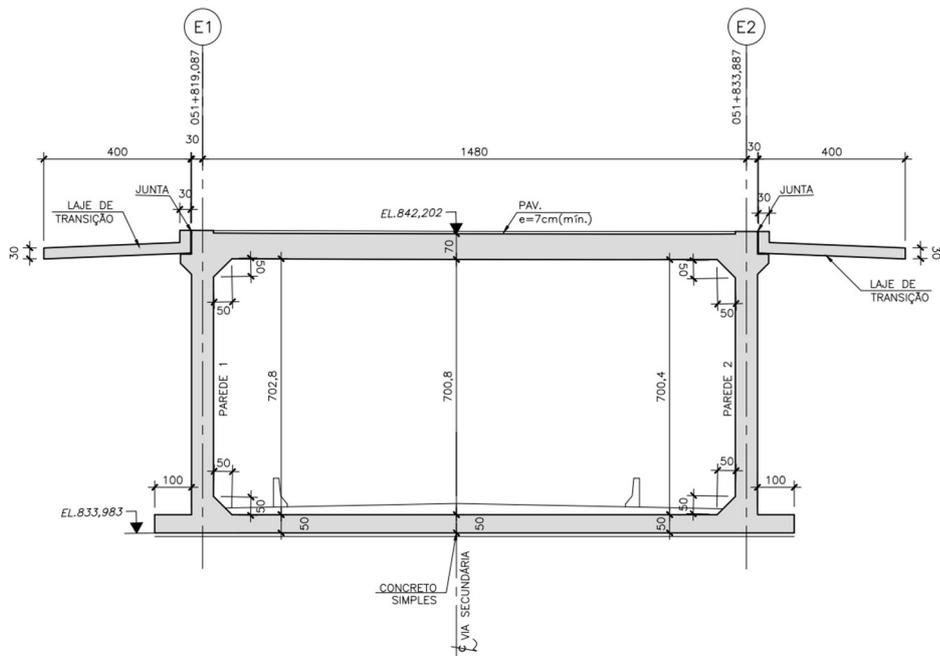


Figura 3.4 – Corte Longitudinal (Geometria)

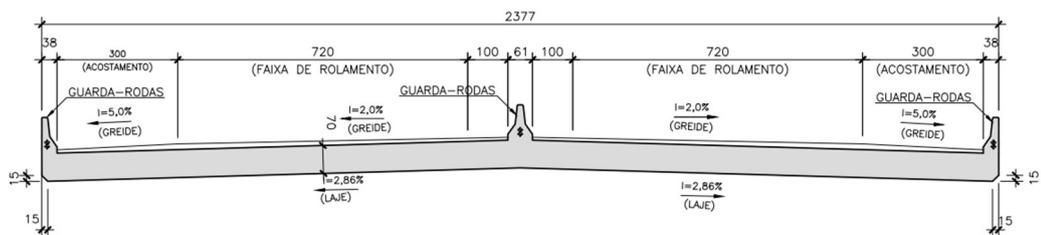


Figura 3.5 – Seção Transversal (Geometria)

3.2. PREMISSAS DE PROJETO

Os materiais, as características e as considerações utilizadas em projeto e apresentadas a seguir visam atender aos requisitos de qualidade estabelecidos nas normas técnicas indicadas, relativos à capacidade resistente, ao desempenho em serviço e à durabilidade da estrutura.

- Classe de Agressividade: II – Moderada, conforme tabela 6.1 da NBR 6118/2014.

3.2.1. MATERIAIS

- Resistências Características:

Galeria Celular (Super, Meso e Infraestrutura): $f_{ck} \geq 30 \text{ MPa}$ (fator A/C $\leq 0,50$);

Dispositivos e Barreiras: $f_{ck} \geq 30 \text{ MPa}$ (fator A/C $\leq 0,50$);

Coefficiente de Poisson = 0,2

- Peso Específico dos Materiais:

Concreto armado: $25,0 \text{ kN/m}^3$ ($2,50 \text{ tf/m}^3$);

Pavimento flexível: $24,0 \text{ kN/m}^3$ ($2,40 \text{ tf/m}^3$).

3.3. METODOLOGIA DE ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural foi dividida na etapa de lançamento do modelo computacional no software de modelagem para determinação da geometria da estrutura e aplicação dos esforços. A partir do modelo, foram obtidos os esforços utilizados para o dimensionamento da estrutura, assim como uma análise observacional do comportamento da estrutura para os diversos carregamentos aplicados

3.3.1. MODELO COMPUTACIONAL

Para a determinação dos esforços atuantes na estrutura, foi elaborado modelo em elementos finitos no software SAP2000 para representar as características geométricas e de carregamento. Esse modelo de cálculo foi desenvolvido baseado nas características geométricas da OAE descritas no item 3.1 e com as propriedades dos materiais em 3.2.1. Foram utilizados elementos de casca (*shell*) para representar as lajes, paredes e alas da OAE e para aplicar os esforços atuantes.

O modelo desenvolvido é apresentado nas imagens a seguir:

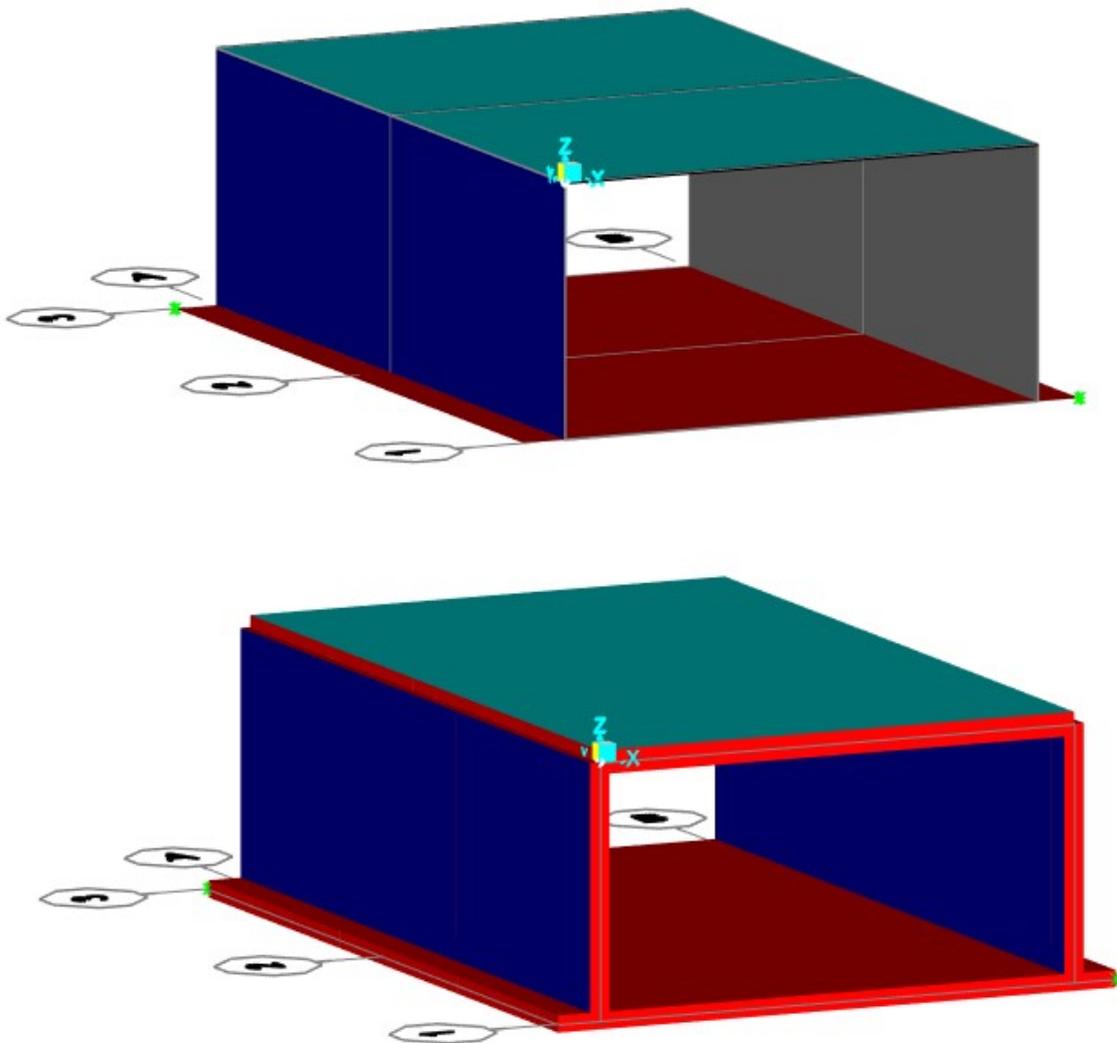


Figura 3.6 – Modelo de computacional analítico e extrudado – Software SAP2000

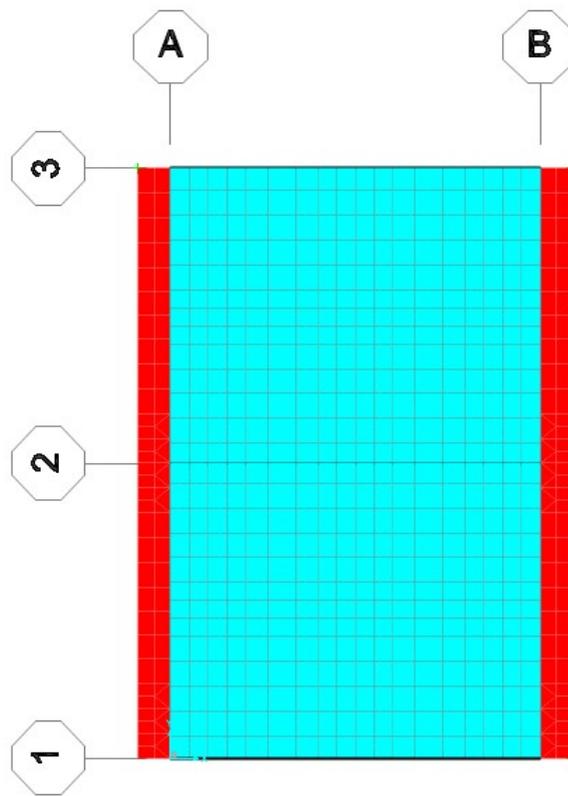


Figura 3.7 – Modelo de cálculo - Vista Superior – Software SAP2000

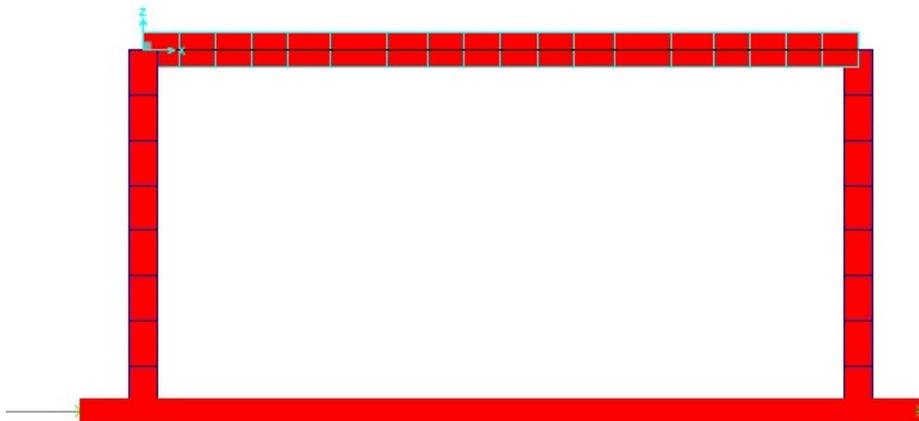


Figura 3.8 – Modelo de cálculo - Vista Lateral –Software SAP2000

3.3.2. CARGAS CONSIDERADAS

3.3.2.1. CARGAS PERMANENTES

- Peso Próprio:

Esta parcela de carregamento é calculada automaticamente pelo programa de análise a partir das dimensões de cada elemento estrutural. Para o concreto armado o peso específico considerado é de 25 kN/m^3 ($2,50 \text{ tf/m}^3$).

- Sobrecarga Permanente (G2):

Para uma camada de pavimentação de 7 cm obtém-se uma carga uniformemente distribuída de $0,07 \times 24 = 1,7 \text{ kN/m}^2$.

Carga uniformemente distribuída adicional de 2 kN/m^2 para atendimento de um possível recapeamento, conforme NBR 7187/2013. **[8]**

Barreira New-Jersey simples: carga linearmente distribuída de $5,80 \text{ kN/m}$.

Barreira New-Jersey dupla: carga linearmente distribuída de $8,00 \text{ kN/m}$.

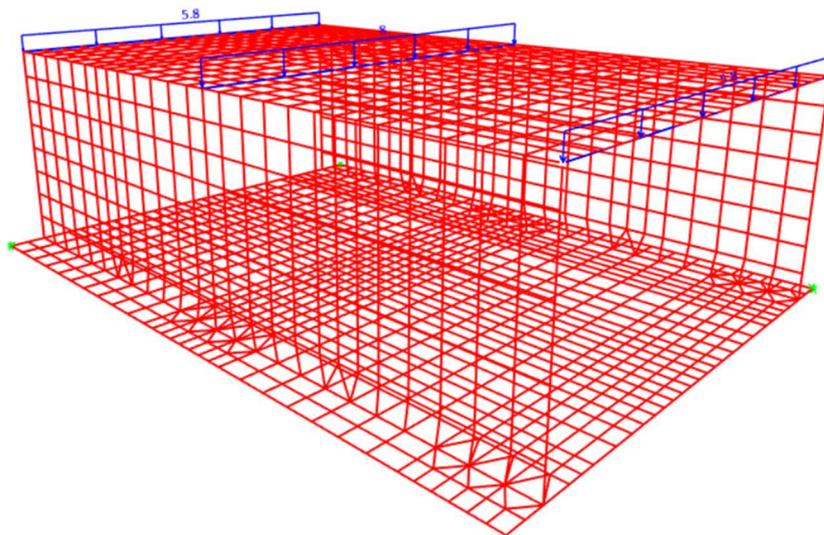


Figura 3.9 - Aplicação do Carregamento de Barreiras Rígidas

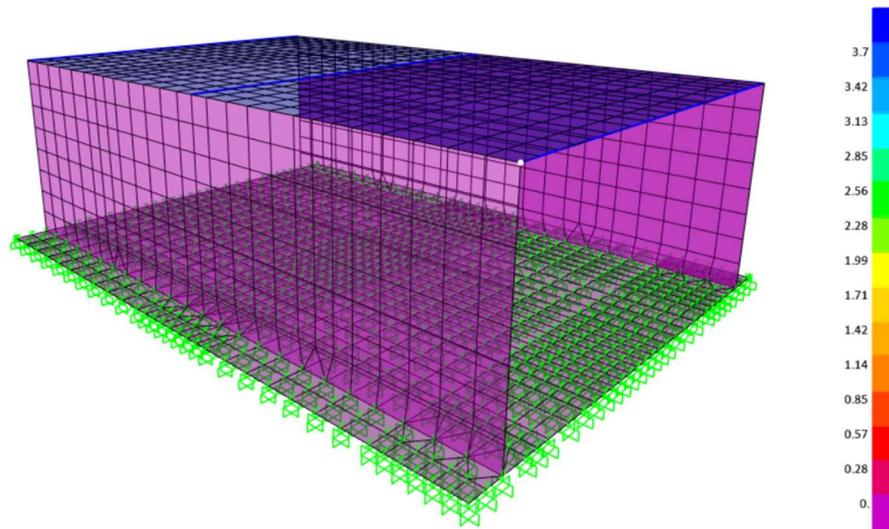


Figura 3.10 - Aplicação do Carregamento de Recapeamento e Pavimentação

- Empuxo de terra:

Para o empuxo de terra, foi considerado um solo com $\gamma_s = 19 \text{ kN/m}^3$

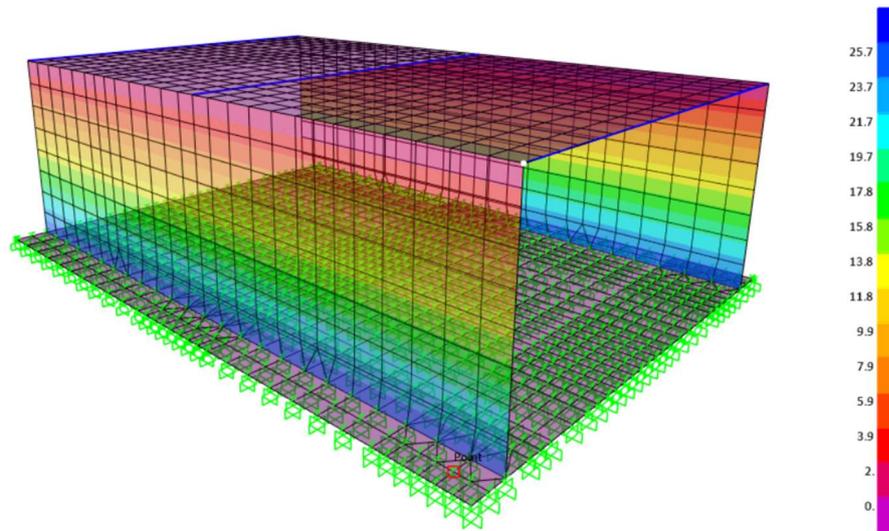


Figura 3.11 - Aplicação do Carregamento de Empuxo de Terra

3.3.2.2. CARGAS VARIÁVEIS

- Retração:

O efeito da retração foi considerado através variação uniforme equivalente de temperatura de -25°C .

- Carga Móvel:

A carga móvel rodoviária utilizada trata-se do trem-tipo padrão TB-450 da NBR 7188/2013 [9], definida por um veículo de 450 kN, com seis rodas, $P = 75\text{ kN}$, três eixos de carga afastados entre si em 1,5 m, com área de ocupação de $18,0\text{ m}^2$, circundada por uma carga uniformemente distribuída constante $p = 5\text{ kN/m}^2$.

A carga móvel (trem-tipo + cargas distribuídas) foi distribuída ao longo de toda a pista rodoviária (incluindo acostamentos e faixas de segurança) com as rodas do trem-tipo na posição mais desfavorável, de modo a se obter os esforços mais desfavoráveis nos elementos estruturais.

De acordo com a NBR7188/2013, as cargas móveis como as do trem-tipo, podem ser analisadas como cargas estáticas através de sua multiplicação por um fator de ponderação, para consideração de seus efeitos dinâmicos. Esse fator é obtido pelo produto de 3 parcelas, coeficiente de impacto vertical (CIV), coeficiente do número de faixas (CNF) e coeficiente de impacto adicional (CIA).

Para a OAE em questão os coeficientes foram calculados conforme apresentado a seguir:

$$Liv = 14,8\text{ m}$$

$$CIV = 1,33$$

$$CNF = 0,90$$

$$CIA = 1,25\text{ (Obra em Concreto)}$$

$$\varphi = 1,50 \rightarrow \text{Próximo à junta}$$

$$\varphi = 1,20 \rightarrow \text{Meio do vão}$$

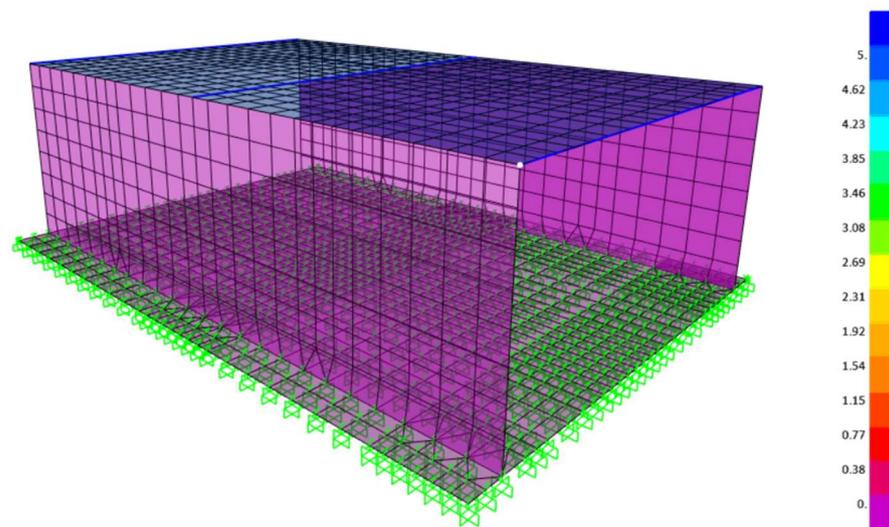


Figura 3.12 - Aplicação do Carregamento de TB45 (Carga na Laje)

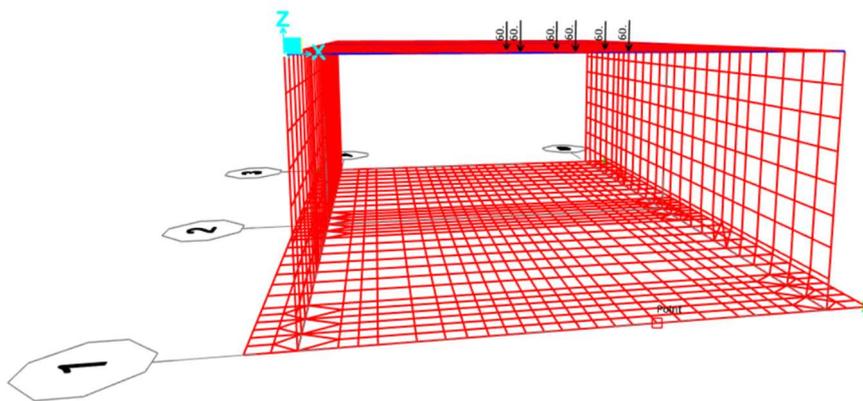


Figura 3.13 - Aplicação do Carregamento de TB45 (Carga do Veículo)

- Variações Uniformes de Temperatura (T+/T-):

Utilizaram-se variações uniformes de temperatura de $\pm 15^\circ$ C atuantes na superestrutura.

3.3.2.3. CARGAS EXCEPCIONAIS

- Colisão ao nível do tabuleiro

Foi considerada uma ação de 100 kN, aplicada no topo das barreiras de proteção, atuante em um comprimento de 50 cm e com distribuição espacial (espraiamento) a 45° .

3.3.3. COMBINAÇÃO DE AÇÕES

Os coeficientes de ponderação e os fatores de combinação para os estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS) são apresentados a seguir. Os coeficientes são utilizados nas combinações de carregamento de forma a provocar as solicitações mais desfavoráveis no dimensionamento.

- ELU – Combinações Normais:

Cargas permanentes $\gamma_g = 1,35$ ou $\gamma_g = 1,00$

Cargas móveis $\gamma_q = 1,50$ ou $\gamma_q = 0$

- ELU – Combinações Especiais:

Cargas permanentes $\gamma_g = 1,25$ ou $\gamma_g = 1,00$

Cargas móveis $\gamma_q = 1,30$ ou $\gamma_q = 0$

- ELU – Combinações Excepcionais (impacto):

Cargas permanentes $\gamma_g = 1,35$ ou $\gamma_g = 1,00$

Cargas móveis $\gamma_q = 1,50$ ou $\gamma_q = 0$ e $\Psi = 0,70$

- ELS – Combinações Frequentes:

Cargas permanentes $\gamma_g = 1,00$

Cargas móveis $\gamma_q = 1,00$ e $\Psi = 0,50$

- ELS – Combinações Quase Permanentes:

Cargas permanentes $\gamma_g = 1,00$

Cargas móveis $\gamma_q = 1,00$ e $\Psi = 0,30$

3.3.4. ESFORÇOS SOLICITANTES

A seguir são apresentados os diagramas de momentos fletores máximos e mínimos em ambas as direções da laje do tabuleiro para a envoltória de estados limites últimos (Envelope_ELU) e serviço (Envelope_ELS) que compõem todas as combinações críticas da OAE.

3.3.4.1. ESTADO LIMITE ÚLTIMO

O estado limite último foi calculado de acordo com os coeficientes de majoração indicados em 3.3.3 para determinar o momento fletor e cortante crítico para a seção:

3.3.4.1.1. MOMENTO FLETOR

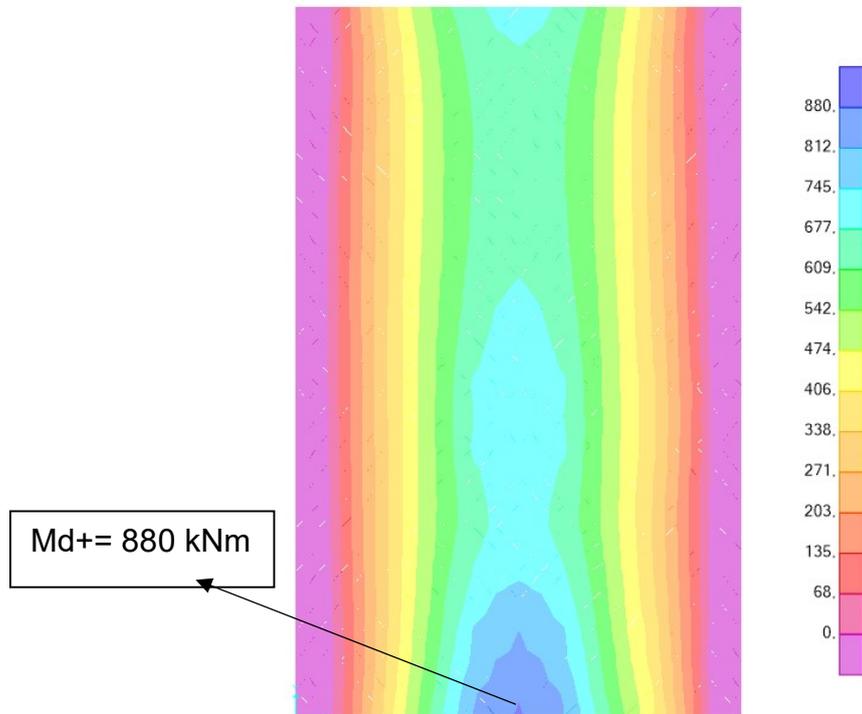


Figura 3.14 - $M_{d,+max}$ [kNm/m] (Direção Transversal - ELU)

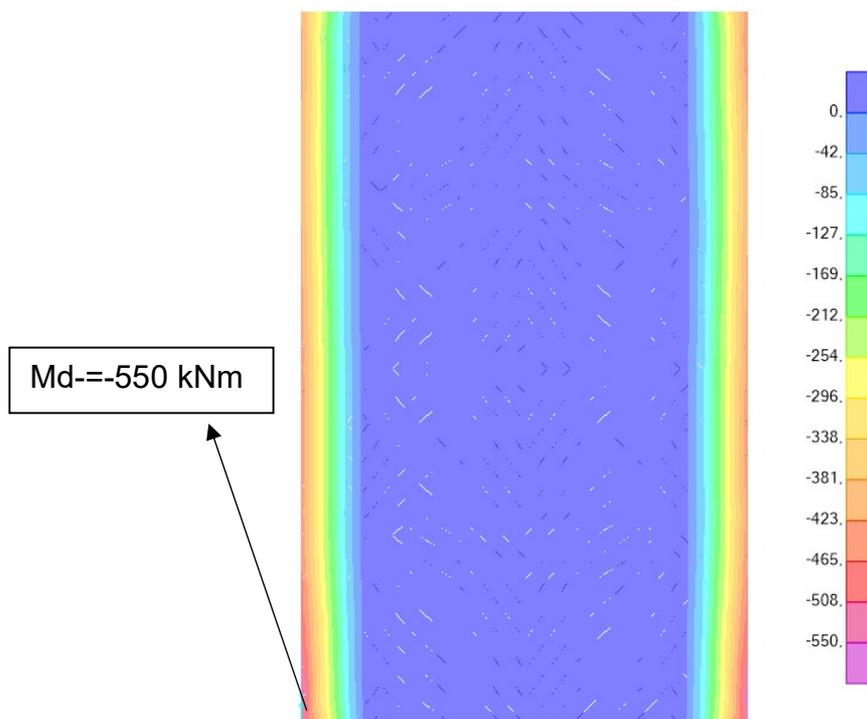


Figura 3.15 - $M_{d,-mín}$ [kNm/m] (Direção Transversal - ELU)

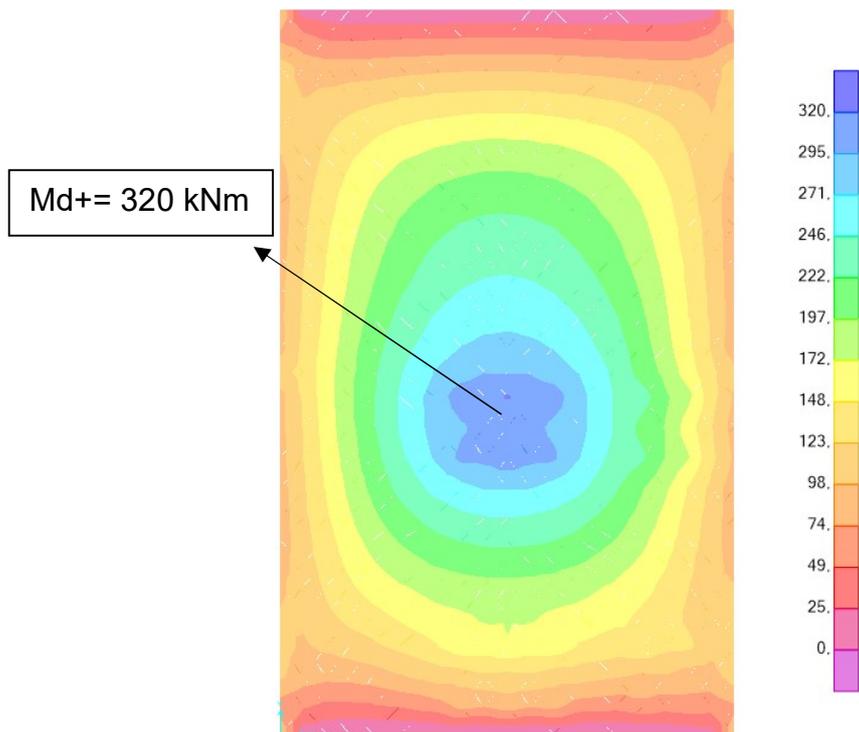


Figura 3.16 - $M_{d,+max}$ [kNm/m] (Direção Longitudinal - ELU)

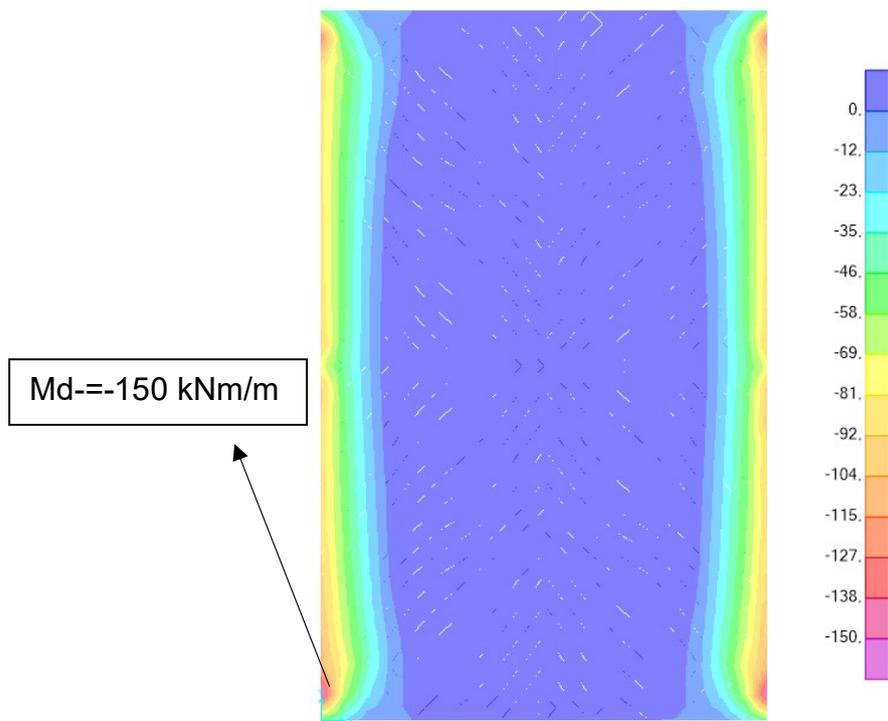


Figura 3.17 - $M_{d,-min}$ [kNm/m] (Direção Longitudinal - ELU)

3.3.4.1.2. CORTANTE

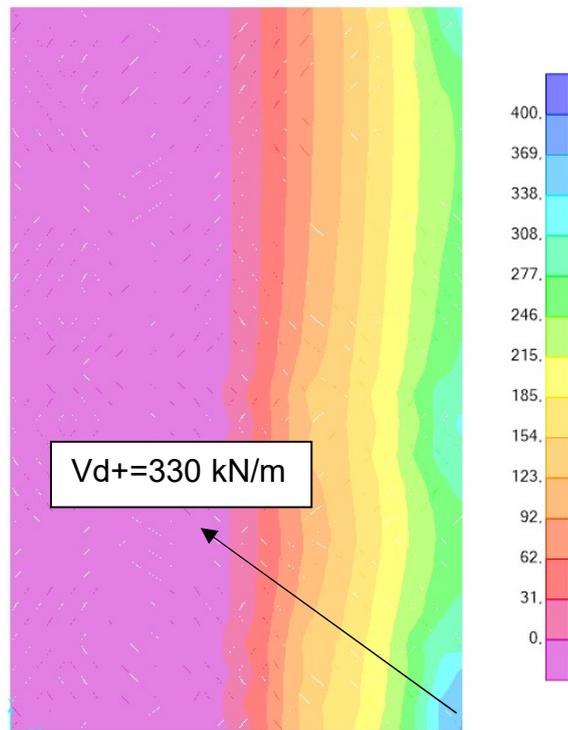


Figura 3.18 - Vd+max [kN/m]

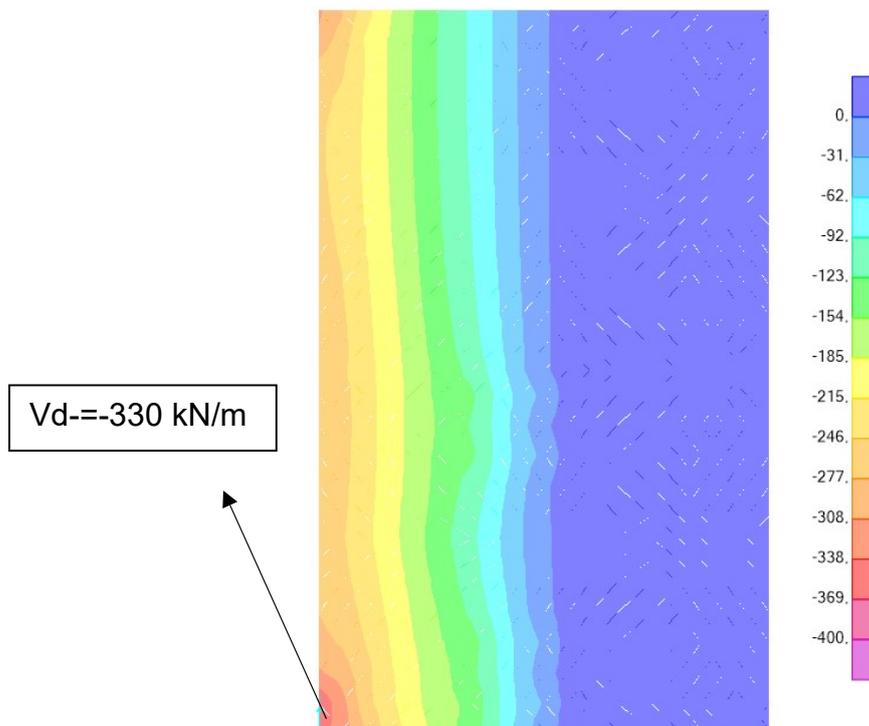


Figura 3.19 - Vd-min [kN/m]

3.3.4.2. ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

A partir do item 3.3.3, também foi possível a criação de um caso de carga que englobasse o estado de limite de serviço para que seja possível calcular o limite de fissuração e flecha.

3.3.4.2.1. MOMENTO FLETOR

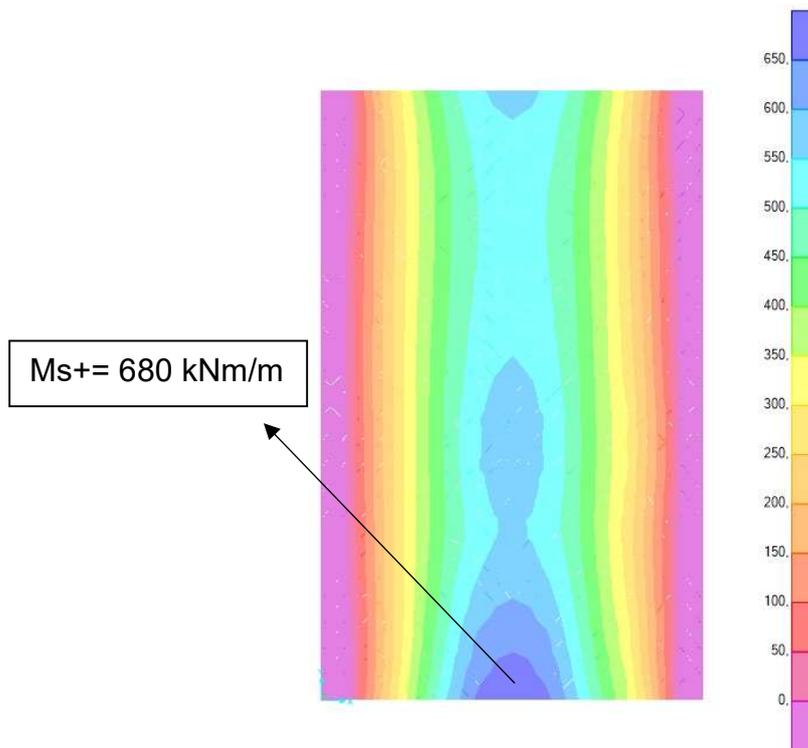


Figura 3.20 - $M_{s,max}$ [kNm/m] (Direção Transversal - ELS)

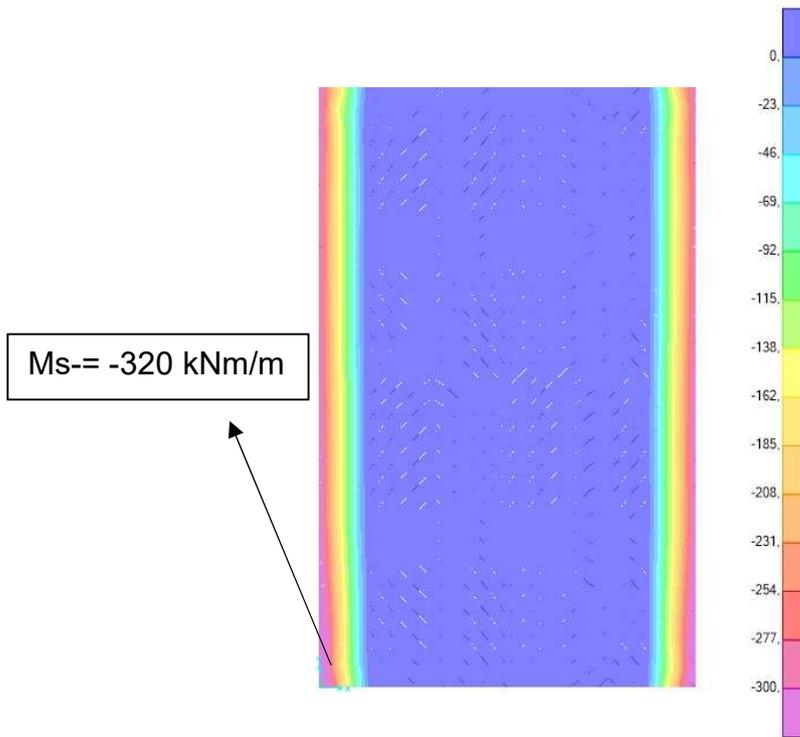


Figura 3.21 - $M_{s,min}$ [kNm/m] (Direção Transversal - ELS)

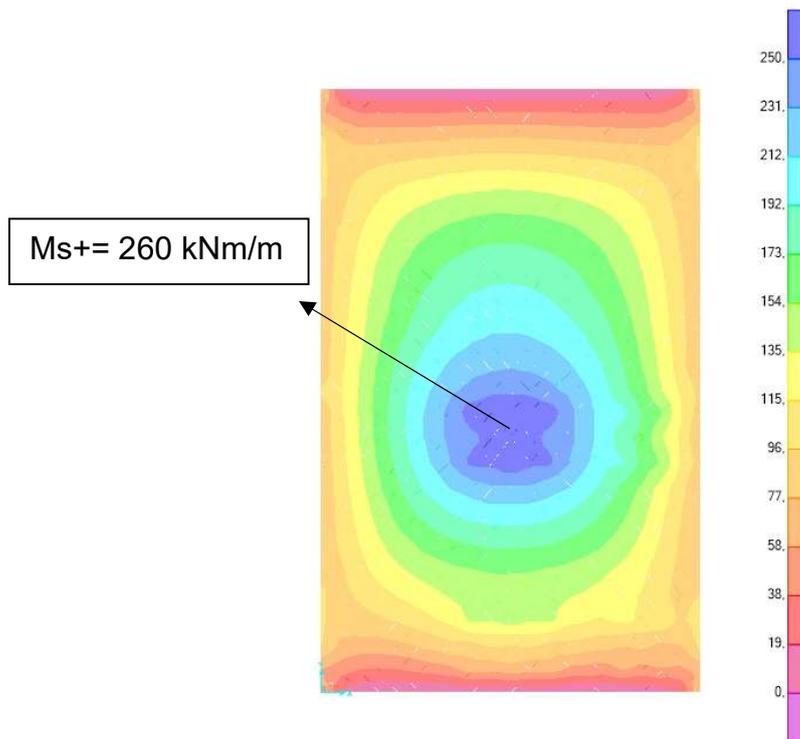


Figura 3.22 - $M_{s,max}$ [kNm/m] (Direção Longitudinal - ELS)

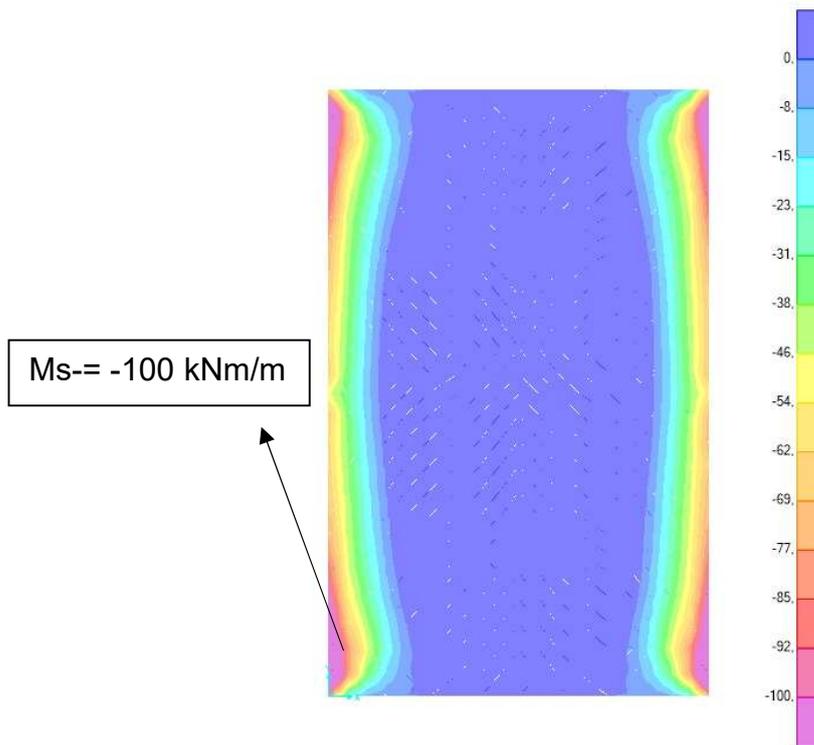


Figura 3.23 - $M_{s,min}$ [kNm/m] (Direção Longitudinal - ELS)

3.4. DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

Para o dimensionamento da ponte sobre o trecho em Papanduva, foram utilizados os esforços determinados no modelo de cálculo computacional e o projeto de estruturas de concreto armado com barras de PRF que está em processo de desenvolvimento na CE-002:124.026 – Comissão de Estudo Estruturas de concreto reforçado com fibras (ABNT). As considerações foram feitas de acordo com os atendimentos da comissão e descritas no item 2.5.

3.4.1. ARMADURAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS

Foram considerados os esforços obtidos no modelo de cálculo para momento fletor na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Momentos Fletores Críticos no ELU

Momento Fletor Crítico (kNm/m)		
Direção	Transversal	Longitudinal
Md+	880	320
Md-	-550	-150

Para o caso de demonstração de cálculo, será feito o dimensionamento da armadura longitudinal da OAE para o momento positivo, sendo este 880 kNm/m . Foram obtidos os valores de cálculo pela comissão de estudo CE-002:124.026 na Tabela 3.2 e seguindo o γ_{FRP} da Tabela 3.3.

Tabela 3.2 - Propriedades do PRFV

E_f (GPa)	f_{fk} (MPa)	ε_{fu} (‰)
45	800	17,7

Tabela 3.3 - Uso do γ_{FRP} pela indicação da CE-002:124.026

Combinação	γ_{FRP}
ELU Normal	1,30
ELU Especial ou de construção	1,20
ELU Excepcional	1,20
ELU Fadiga e ELU Fluência	3,00
ELS	1,00

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_f} = \frac{30}{1,4} = 21,4 \text{ MPa}$$

$$E_f = 45000 \text{ MPa}$$

$$f_{fd} = C_E \frac{f_{fk}}{\gamma_{FRP}} = 0,85 \cdot \frac{800}{1,3} = 523 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035 \text{ [7]}$$

$$\lambda = 0,8 \text{ [7]}$$

$$\alpha_c = 0,85 \text{ [7]}$$

$$h = 700 \text{ mm}$$

$$d = 0,9h = 630 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$\rho_{fb} = 0,8 \cdot 0,85 \cdot \frac{21,4}{523} \frac{45000 \cdot 0,0035}{45000 \cdot 0,0035 + 523} = 0,645\%$$

Para o caso de ruptura por esmagamento do concreto, utiliza-se $\rho_f \geq \rho_{fb}$. É determinada, também, uma armadura de PRFV em com 98,18 cm²/m para a laje, que é o equivalente 20Ø25mm c. 10, que será posicionado em duas camadas de 10 barras.

Logo,

$$x = \frac{1}{2b} \frac{\varepsilon_{cu} A_f E_f}{\lambda \alpha_c f_{cd}} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda \alpha_c f_{cd}}{\varepsilon_{cu} A_f E_f} b d} \right)$$

$$x = \frac{1}{2 \cdot 100} \frac{0,0035 \cdot 9818 \cdot 45000}{0,80 \cdot 0,85 \cdot 21,4} \left(-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{0,80 \cdot 0,85 \cdot 21,4}{0,035 \cdot 44 \cdot 45000} 1000 \cdot 630} \right)$$

$$x = 211 \text{ mm}$$

Para o cálculo do momento resistente:

$$\sigma_{fd} = \frac{x b \alpha_c \lambda f_{cd}}{A_f} = \frac{211 \cdot 1000 \cdot 0,8 \cdot 0,85 \cdot 21,4}{9818}$$

$$\sigma_{fd} = 313 \text{ MPa}$$

Assim,

$$M_{Rd} = \sigma_{fd} A_f \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) = 313 \cdot 9818 \cdot \left(630 - \frac{0,8 \cdot 211}{2} \right) = 1677 \text{ kNm}$$

$$1677 > 880 \text{ kNm (OK)}$$

Para verificação se a armadura adotada está no limite estipulado pelo momento resistente mínimo e as armaduras máximas e mínimas:

$$\gamma_t = 700 - 211 = 489 \text{ mm}$$

$$I_c = \frac{100 \cdot 70^3}{12} = 285,8 \text{ cm}^4$$

$$M_{d,min} = 1,5 \frac{285,8}{489} \cdot 3,77 = 330 \text{ kN}$$

- Armadura Mínima para garantir rompimento por esmagamento do concreto:

$$A_{f,max} = \rho_{fb} h b$$

$$A_{f,max} = 0,00645 \cdot 70 \cdot 100 = 45,13 \text{ cm}^2 / m$$

- Armadura Mínima da seção:

$$\rho_{f,min} = 0,3 \frac{f_{ctk,sup}}{f_{fd}}$$

Pela norma NBR 6118:2023 [7]:

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m}$$

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{(2/3)}$$

Dessa forma,

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot 30^{(2/3)} = 2,90 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \cdot 2,90 = 3,77 \text{ MPa}$$

Determinando, então,

$$\rho_{f,min} = 0,3 \cdot \frac{3,77}{523} = 0,216\%$$

Aplicando essa taxa para a seção bruta da laje:

$$A_{f,min} (taxa) = 0,216\% \cdot 100 \cdot 70 = 15,12 \text{ cm}^2$$

Além disso, deve-se calcular a armadura longitudinal mínima na zona tracionada para elementos sujeitos a deformações impostas tais como temperatura e retração pode ser determinada como:

$$k = 0,8$$

$$k_c = 0,4 \rightarrow \text{flexão simples}$$

$$A_{f,\text{mín}}(\text{temp}) = k k_c f_{ctk,\text{sup}} \frac{A_{ct}}{\sigma_f}$$

Dessa forma,

$$A_{ct} = (h - x)b$$

$$A_{ct} = (700 - 211) \cdot 1000 = 489107 \text{ mm}^2$$

$\sigma_f = 155 \text{ MPa}$, calculado pelo limite de fissuração em 3.4.3.

Tem-se:

$$A_{f,\text{mín}} = 0,8 \cdot 0,4 \cdot 3,77 \cdot \frac{389107}{155} = 3814 \text{ mm}^2$$

Através da comparação das taxas de armaduras mínimas limitantes para a seção, pode-se indicar que o valor calculado de $98,18 \text{ cm}^2/\text{m}$ é superior a todas, de forma que pode ser adotado.

$$A_{s \text{ adot}} = 20\emptyset 25\text{mm} \text{ c. } 10\text{cm} = 98,18 \text{ cm}^2/\text{m}$$

3.4.2. VERIFICAÇÃO PARA ESFORÇO CORTANTE

Foram considerados os seguintes efeitos de cortante no ELU da OAE na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Esforços Cortantes Críticos no ELU

Esforço Cortante Crítico (kN/m)	
Vd+	330
Vd-	-330

- Verificação das diagonais comprimidas:

$$V_{Rd2} = 0,27 \alpha_{v2} f_{cd} b_w d$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot 21,43 \cdot 1000 \cdot 630 = 3208 \text{ kN}$$

$$330 < 3208 \text{ (OK)}$$

- Verificação das diagonais tracionadas:

$$V_c = 0,6 f_{ctd} b_w x_{II}$$

Então,

$$f_{ctd} = \frac{2,90}{1,4} = 2,07 \text{ MPa}$$

$$E_c = 5600 \sqrt{f_{ck}} = 30672 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{E_f}{E_c} = \frac{45000}{30672} = 1,47$$

$$x_{II} = \frac{-nA_s + \sqrt{(nA_s)^2 + 2nA_s b d}}{b}$$

$$x_{II} = \frac{-1,47 \cdot 9818 + \sqrt{(1,47 \cdot 9818)^2 + 2 \cdot 1,47 \cdot 9818 \cdot 1000 \cdot 630}}{1000} = 121 \text{ mm}$$

$$V_c = 0,6 \cdot 2,07 \cdot 1000 \cdot 121 = 150 \text{ kN}$$

Como,

$$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_f$$

$$150 < 330 \text{ kN (Não Passa)}$$

Como o valor de V_c não é superior a V_{Rd3} , é necessário a adição de estribos (V_f) e estes são calculados por:

$$V_f \geq V_{Sd} - V_c$$

$$V_f \geq 180$$

$$V_f = 0,9 d f_{fvd} \left(\frac{A_{ft}}{s} \right)$$

$$f_{fbk} = 0,45 \cdot 800 = 360 \text{ MPa}$$

$$0,5\% E_f = 225 \text{ MPa}$$

$$f_{fvd} = \frac{225}{1,4} = 160 \text{ MPa}$$

$$\frac{V_f s}{0,9 d f_{fvd}} = A_{ft}$$

$$\frac{180 \cdot 100}{0,9 \cdot 630 \cdot 225} = A_{ft} = 2,96 \text{ cm}^2$$

$$\frac{2,96}{4} = 0,74 \text{ cm}^2 < \emptyset 10 \text{ mm}$$

$$A_{ft \text{ adot}} = \emptyset 10 \text{ mm c. } 15 \text{ cm} = 5,24 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Considerando 4 pernas de estribo a cada seção de 1 metro de laje.

3.4.3. VERIFICAÇÃO DE FISSURAÇÃO

Foram considerados os esforços obtidos no modelo de cálculo para momento fletor na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Momentos Fletores Críticos no ELS

Momento Fletor Crítico (kNm/m) - ELS		
Direção	Transversal	Longitudinal
Ms+	680	260
Ms-	-320	-100

A abertura de fissura característica em vigas de concreto armado com barras de FRP pode estimada como:

$$w_k = \frac{2}{E_f} \left[1,5c_{nom} + \frac{1}{4} \frac{f_{ctm}}{\tau_b} \frac{\phi}{\rho_{ef}} \right] \left[\sigma_f - \frac{1}{2} \frac{f_{ctm}}{\rho_{ef}} \left(1 + \frac{E_f}{E_{cs}} \rho_{ef} \right) \right] \geq 0$$

Para o cálculo do σ_f , é feita uma retroanálise considerando a abertura máxima da fissura permitida por norma, considerando a Tabela 3.6. Esse valor é necessário para o cálculo da armadura mínima necessária no item 3.4.1.

Tabela 3.6 - Classe de Agressividade Ambiental para Limite de Fissuração

Classe de agressividade ambiental	w_{max} (mm)
CAA-FRP-I	0,7
CAA-FRP-II	0,6
CAA-FRP-III	0,5

Então,

$$C_{nom} = 40 \text{ mm}$$

$$\tau_b = 1,8 f_{bd}$$

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 f_{ctd}$$

$$\eta_1 = 1,3 \rightarrow$$

$$\rho_{ef} = \frac{A_f}{b h_{ef}}$$

$$h_{ef} \leq 2,5 d' \text{ ou } \frac{h - x_{II}}{3}$$

$$\phi = 25 \text{ mm}$$

Logo,

$$f_{bd} = 1,3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,07 = 2,69 \text{ MPa}$$

$$\tau_b = 4,84 \text{ MPa}$$

$$2,5 d' = 100 \text{ mm}$$

$$\frac{h - x_{II}}{3} = \frac{700 - 121}{3} = 579 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = 100 \text{ mm}$$

$$\rho_{ef} = \frac{9818}{1000 \cdot 100} = 9,82\%$$

Assim,

Devido a Classe de Agressividade II considerada para o projeto, o limite de fissura w_k é calculado como 0,6mm.

$$\sigma_f = \frac{w_k E_f}{2 \left[1,5c_{nom} + \frac{1}{4} \frac{f_{ctm}}{\tau_b} \frac{\phi}{\rho_{ef}} \right]} + \left[\frac{1}{2} \frac{f_{ctm}}{\rho_{ef}} \left(1 + \frac{E_f}{E_{cs}} \rho_{ef} \right) \right]$$

$$\sigma_f = 155 \text{ MPa}$$

3.4.4. VERIFICAÇÃO DE FLECHA

O cálculo do momento de inércia equivalente parte das seguintes considerações:

$$I_e = \frac{I_{II}}{1 - \gamma \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^2 \left(1 - \frac{I_{II}}{I_c} \right)} \leq I_c$$

Para,

$$M_r = 1,5 \frac{I_c}{y_t} f_{ctk,sup}$$

$M_a = 660 \text{ kNm/m}$, retirado da Tabela 3.5.

$$I_c = \frac{1000 \cdot 700^3}{12} = 2,86 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$y_t = \frac{700}{2} = 350 \text{ mm}$$

$$M_r = 1,5 \frac{2,86 \cdot 10^{10}}{350} 3,77 = 461 \text{ kNm}$$

$$\gamma = 1,7 - 0,7 \left(\frac{461}{680} \right) = 1,23$$

Calcula-se, também:

$$I_{II} = \frac{b x_{II}^3}{3} + n A_s (d - x_{II})^2$$

$$I_{II} = \frac{1000 \cdot 121^3}{3} + 1,47 \cdot 9818 (630 - 121)^2 = 0,432 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

Assim,

$$I_e = \frac{0,829 \cdot 10^{10}}{1 - 1,23 \left(\frac{461}{680}\right)^2 \left(1 - \frac{0,829}{2,86}\right)} = 0,173 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

A partir do cálculo do momento de inercia equivalente (I_e), é refeito o modelo computacional para determinação da flecha máxima.

$$0,829 \cdot 10^{10} = \frac{1000 \cdot h'^3}{12}$$
$$h' = 46 \text{ cm}$$

Aplicando no modelo computacional SAP2000:

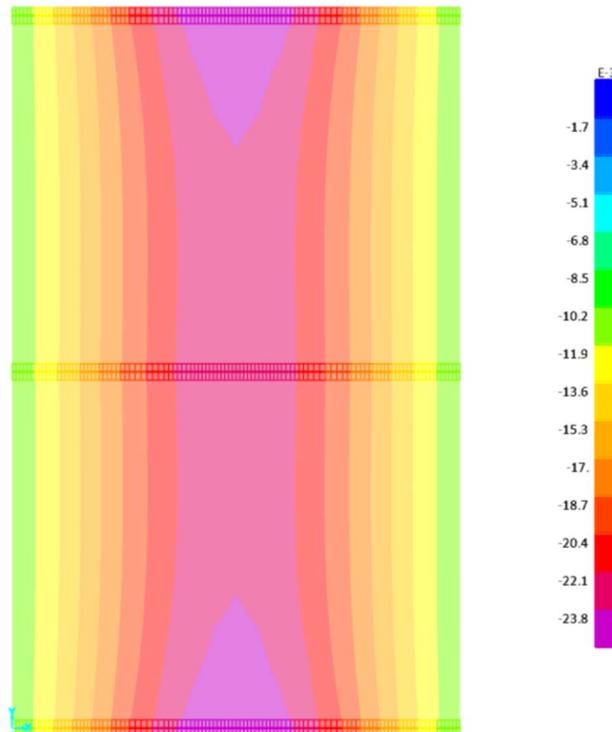


Figura 3.24 - Flecha Máxima na Seção Equivalente

O modelo determinou uma flecha de 25,3 mm e, ao aplicar o cálculo da flecha diferida com o tempo, deve-se verificar a Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Valores do Coeficiente $\xi(t)$ em função do tempo

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	70
Coeficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

E,

$$\alpha_f = \frac{\xi(t) - \xi(t_0)}{1 + 50\rho_s'}$$

Como não foram dimensionadas armaduras para aço, $\rho_s' = 0$ e, consideramos $\xi(t) = 2$ para tempo de 70 meses e $\xi(t_0) = 0,95$ para tempo inicial de 3 meses.

Logo,

$$\alpha_f = \frac{2 - 0,95}{1} = 1,05$$

Assim,

$$25,3 \cdot (1 + 1,05) = 51,9 \text{ mm}$$

Para o limite de deslocamento na seção, é consultada a Tabela 2.6, onde o valor máximo de deslocamento é considerado $l/250$ e $l = 14,2m$.

$$\frac{14200}{250} = 56,8 \text{ mm}$$

Dessa forma,

$$51,9 \leq 56,8 \text{ mm (OK)}$$

4. CONCLUSÃO

O trabalho desenvolveu um estudo de caso utilizando modelo computacional para o dimensionamento e análise de aplicação do polímero revestido em fibra de vidro para uma obra de arte espacial, utilizando as considerações pela CE-002:124.026 – Comissão de Estudo Estruturas de concreto reforçado com fibras. O objetivo foi verificar se o material seria viável para o dimensionamento da estrutura e seu potencial para uso futuro em demais pontes pelo Brasil a partir da futura norma ABNT.

Foram descritas as principais características do material, assim como elaborado um comparativo com barras de aço. O polímero revestido com fibra de vidro se apresenta como um substituo viável para o aço e revoluciona o meio da construção civil com sua aplicabilidade em ambientes corrosivos, leveza e durabilidade. Seu desenvolvimento ainda está em progresso no Brasil e no mundo, mas é visto com bons olhos o crescimento que terá nos próximos anos.

O estudo de caso mostrou a versatilidade do material para aplicação em diferentes situações e contextos. Este desenvolvimento mostrou, também, como suas propriedades diferem do aço. O seu módulo de elasticidade reduzido traz uma sensibilidade ao material aos Estados Limites de Serviço que limitam seu dimensionamento. Esse dado pode ser observado na aplicação para o caso da ponte sobre o trecho de Papanduva, onde a armadura longitudinal se mostrou suficiente para resistir com folga aos esforços do Estado Limite Último, mas teve seu emprego controlado pelas verificações de flecha e fissura.

Apesar de suas limitações, o polímero revestido em fibra de vidro continua se mostrando como uma inovação no mercado, sendo comumente utilizado em reforços estruturais e menores construções. Devido a sua capacidade não corrosiva, é esperado que seja acatado, principalmente pela indústria naval ou para construções com próximas ao mar como um substituto do aço e seja um dos pioneiros a levar a engenharia civil aos poucos a sustentabilidade. Importante notar que a construção civil é uma das áreas comerciais com a maior pegada de carbono, de forma que, iniciativas como essa, nos leve a pequenos passos um mundo mais sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NANNI, A.; DE LUCA, A. ; JAWAHERI ZADEH, H.. Reinforced Concrete with FRP Bars. Taylor & Francis Group, 2014.
2. ACI 440.1R-15: **Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars**. ACI Committee 440, 2015.
3. CODE, F. M.. **fib Model Code for Concrete Structures 2010**. Fib Model Code for Concrete Structures 2010, p.1-402, 2013.
4. BERTON, Kauana Moraes. **Investigação teórico-experimental de vigas armadas com barras de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) submetidas à flexão**. 2019.
5. GARY, Bruno Caravelas. **Avaliação de compósitos poliméricos de fibra de vidro e resina éster vinílica e de fibra de vidro e resina poliéster revestidos com impermeabilizante em meio ácido e temperatura**. Universidade de São Paulo.
6. MICALI, Roberto Mauricio. **Análise teórica de vigas pré-moldadas de concreto com armadura de aço e de polímero reforçado com fibra de vidro em meio altamente agressivo**. 2010. Universidade de São Paulo.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro. 2023
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NROMAS TÉCNICAS. **NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento**. Rio de Janeiro. 2013
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NROMAS TÉCNICAS. **NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas**. Rio de Janeiro. 2013
10. KORNEV, Oleg; KAKUSHA, Vladimir; ZHIDKOV, Yuri; LAPSHIOV, Andrey; MIKHALDYKIN, Evgeni. **Durability and structural evaluation of bridge girders prestressed with GFRP ties after 41 years of maintenance**. Moscow, 2023

11. BUENO, G. M.; TOCHETTO, V. A.; BRISOTTO, D. S. **BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS: UMA ALTERNATIVA PARA AUMENTAR A DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.** In: Anais INOVTEC 2020/INOVTEC Proceedings 2020 9 Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul 2º Seminário de Educação, Trabalho e Tecnologias Nineth Innovation and Technology Seminar IFSul Second Education, Work and Technologies Seminar.

12. LIUBARTAS, Déborah et al. **A Sustentabilidade do aço e das Estruturas Metálicas/Sustainability of steel and steel structures.** INOVAE-Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation (ISSN 2357-7797), v. 3, n. 1, p. 92-110, 2015.