

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

THOMÁS LAYDNER QUINTEIRO VASCONCELLOS LEAL

DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE
VIGAS PRÉ-FABRICADAS COM OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

PORTO ALEGRE

2020

THOMÁS LAYDNER QUINTEIRO VASCONCELLOS LEAL

DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE VIGAS PRÉ-FABRICADAS COM OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Comissão de Graduação do Curso de Engenharia
Civil da Escola de Engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: José Alberto Azambuja

PORTO ALEGRE

2020

THOMÁS LAYDNER QUINTEIRO VASCONCELLOS LEAL

DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE VIGAS PRÉ-FABRICADAS COM OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Alberto Azambuja (UFRGS)

Dr. pelo PPGEC / UFRGS

Orientador

Prof. Luciani Somensi Lorenzi (UFRGS)

Dra. pela UFRGS

Prof. Humberto Ramos Roman (UFSC)

Dr. pela Universidade de Sheffield

Prof. Inácio Benvegnu Morsch (UFRGS)

Dr. pelo PPGEC / UFRGS

PORTO ALEGRE

2020

AGRADECIMENTOS

O período em que permanecemos na universidade é repleto de desafios, os quais diariamente precisamos superar. Ao longo desse caminho pude contar com o apoio de diversas pessoas que foram fundamentais para que eu obtivesse sucesso nesse percurso.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho. Aos meus pais Ivan Sérgio Vasconcellos Leal e Cláudia Laydner Quinteiro Leal, à minha irmã Luísa Laydner Quinteiro Vasconcellos Leal por terem, em todos esses anos, me dado todo o apoio e proporcionado todas as condições para que eu pudesse desenvolver-me profissionalmente. À minha namorada, Emilli Pereira Ferrari, que me incentivou nos momentos difíceis e compreendeu a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer aos ensinamentos de todos os meus professores da graduação na Escola de Engenharia da UFRGS, com os quais aprendi muito ao longo do curso, mas especialmente ao meu orientador José Alberto Azambuja por compartilhar comigo todo o seu conhecimento, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual me orientou nesta etapa tão importante. Agradeço também ao Prof. Herbert M. Gomes por sua contribuição fundamental à elaboração do projeto.

À toda equipe da LBF Engenharia e Serviços, por terem me proporcionado muitos aprendizados ao longo do meu período como estagiário, pelas amizades feitas e por fornecer todo o apoio necessário durante o desenvolvimento do projeto.

Aos meus familiares e amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período em que me dediquei a este trabalho.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho, em especial aos laboratórios LEME e LAMEF por fornecerem o espaço e os equipamentos necessários para a realização dos ensaios, e a todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho, meu mais profundo agradecimento.

RESUMO

Soluções inovadoras têm aparecido na indústria da construção civil visando a solução de seus problemas. O conceito de inovação difere do de invenção, pois esta, além de apresentar algo novo, deve possuir uma aplicabilidade atrelada a si. No processo de inovação estão incluídas algumas etapas, são elas: pesquisa, concepção, desenvolvimento e introdução no mercado. A passagem por essas etapas resultará na produção e utilização de novos produtos e processos.

O surgimento de novas tecnologias é proveniente da tensão gerada pela interação entre a necessidade de lucro e produtividade (ambiente competitivo) e a necessidade de respeitar as normas e legislação vigentes (ambiente normativo). Estes ambientes se encontram em tensão permanente e a busca por soluções satisfatórias para ambos é o que gera a inovação.

O conceito de otimização topológica é uma solução inovadora, apresentando uma abordagem diferente à usualmente utilizada nos problemas estruturais de engenharia civil. Embora seja uma abordagem capaz de fornecer o mesmo desempenho estrutural aos elementos (atendendo às demandas do ambiente normativo), com um consumo muito menor de materiais (justificando sua utilização no ambiente competitivo), ainda possui uma aplicação incipiente na indústria da construção civil. Dessa forma, tem-se uma inovação no processo, tanto na fase de concepção quanto na fase construtiva.

Tratando-se de tecnologias emergentes na engenharia, é de suma importância a realização de estudos onde sejam avaliadas tanto a viabilidade técnica quanto econômica desses sistemas construtivos inovadores.

Palavras chave: Solução, Inovação, Desenvolvimento, Otimização Topológica.

ABSTRACT

Innovative solutions have appeared in the construction industry aiming to solve its problems. The concept of innovation differs from that of invention, as this, in addition to presenting something new, must have an applicability linked to it. Some steps are included in the innovation process, which are: research, framing, development and market introduction. Passing through these steps will result in the production and utilization of new products and processes.

The emergence of new technologies is due to the tension generated by the interaction between the need for profit and productivity (competitive environment) and the need to respect current rules and legislation (normative environment). These environments are in constant tension and the search for satisfactory solutions for both is what generates innovation.

The concept of topological optimization is an innovative solution, presenting a different approach to the one usually used in structural problems in civil engineering. Although it is an approach capable of providing the same structural performance to the elements (answering to the demands of the normative environment), with a much lower consumption of materials (justifying its existence in the competitive environment), it still has an incipient application in the construction industry. Therefore, we have an innovation in the process, both in the design phase and in the construction phase.

When it comes to emerging technologies in engineering, it is extremely important to carry out studies in which both the technical and economic feasibility of these innovative construction systems are evaluated.

Key Words: Solutions, Innovation, Development, Topological Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relevância da otimização topológica	14
Figura 2 – Método de Azambuja para desenvolvimento de produtos de edificação	19
Figura 3 – Árvore de eventos para as causas	20
Figura 4 – Árvore de eventos para as consequências	20
Figura 5 – Processo Energético	22
Figura 6 – Fluxograma de atividades.....	25
Figura 7 – Ilustração esquemática da viga biapoiada	27
Figura 8 – Diagramas de uma viga biapoiada	27
Figura 9 – Detalhamento da seção transversal	30
Figura 10 – Detalhamento da seção longitudinal.....	33
Figura 11 – Detalhamento do gancho	34
Figura 12 – Processo de otimização realizado.....	35
Figura 13 – Superfície de falha para o concreto-aço	37
Figura 14 – Densidade final do material.....	37
Figura 15 - Tensões de von Mises [Pa] $(3J_2)^{0,5}$	38
Figura 16 – Direções principais das solicitações	38
Figura 17 – Detalhamento dos nós	39
Figura 18 – Tensões principais 1 [Pa]	39
Figura 19 – Tensões principais 2 [Pa]	40
Figura 20 – Superfície de falha para o concreto-fibra	44
Figura 21 – Densidade final da viga com fibra de carbono	45
Figura 22 - Tensões de von Mises [Pa] $(3J_2)^{0,5}$	45
Figura 23 - Direções principais das solicitações	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 24 - Detalhamento dos nós	46
Figura 25 - Tensões principais 1 [Pa]	47
Figura 26 - Tensões principais 2 [Pa]	47
Figura 27 – Equipamento de corte e dobra	56
Figura 28 – Carretel de fibra de vidro	57
Figura 29 – Posicionamento e geometria das fibras	60
Figura 30 – Obra utilizando concreto de pós reativos	62
Figura 31 – Ensaio de espalhamento (<i>slump flow</i>)	63
Figura 32 – Ilustração do sistema para elementos protendidos	65
Figura 33 – Fio de fibra de carbono	67
Figura 34 – Chapa de compensado sarrafeado e painéis	69
Figura 35 – Equipamento utilizado no corte dos painéis	69
Figura 36 – Identificação dos painéis da viga de CA	70
Figura 37 – Montagem da fôrma da viga de CA finalizada	70
Figura 38 – Montagem da armadura finalizada	71
Figura 39 – Conferência pré-concretagem	72
Figura 40 – Mistura de concreto C30 realizada em betoneira	72
Figura 41 - Identificação dos painéis da viga com fibra	73
Figura 42 – Materiais utilizados para marcação dos pontos	74
Figura 43 – Painel com fôrmas internas e nós indicados	74
Figura 44 - Montagem da fôrma da viga com fibra finalizada	75
Figura 45 – Identificação do sistema de fôrmas internas	76
Figura 46 – Fixação do sistema de fôrmas internas	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 47 – Carretel de fibra de carbono	76
Figura 48 – Detalhamento do posicionamento dos fios	77
Figura 49 – Identificação dos nós da estrutura	77
Figura 50 – Identificação dos tirantes da estrutura	77
Figura 51 – Detalhamento da quantidade de fios	78
Figura 52 – Início do posicionamento da fibra de carbono	78
Figura 53 – Finalização do posicionamento das fibras	79
Figura 54 – Jogo de parafuso utilizado	79
Figura 55 – Parafuso fixado na região do nó	80
Figura 56 – Fixação dos parafusos na face inferior	80
Figura 57 – Agregados utilizados no concreto	81
Figura 58 – Adição de aditivo superplastificante	82
Figura 59 – Auxílio de haste metálica na concretagem	82
Figura 60 – Acabamento da viga	83
Figura 61 – Viga com otimização topológica desformada	83
Figura 62 – Estrutura posicionada para o ensaio	85
Figura 63 – Gráfico de carregamento da viga com otimização topológica	86
Figura 64 – Ruptura da viga com otimização topológica	87
Figura 65 – Sistema de ancoragem aprimorado	88
Figura 66 – Gráfico de carregamento da viga de concreto armado convencional	88
Figura 67 – Ruptura da viga de concreto armado convencional	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe de agressividade ambiental em estruturas	29
Tabela 2 – Verificação dos nós da viga com aço CA-50	41
Tabela 3 – Verificação das bielas da viga com aço CA-50	42
Tabela 4 – Dimensionamento dos tirantes da viga com aço CA-50	43
Tabela 5 - Verificação dos nós da viga com fibra	48
Tabela 6 - Verificação das bielas da viga com fibra	49
Tabela 7 - Dimensionamento dos tirantes da viga com fibra	50
Tabela 8 – Classificação das fibras de carbono	58
Tabela 9 – Densidade de aço CA-25 e CA-50	93
Tabela 10 – Quantitativo de materiais para concreto C30	94
Tabela 11 – Quantitativos da viga de concreto armado	94
Tabela 12 – Quantitativo de fibra de carbono	95
Tabela 13 – Quantitativo de fôrmas internas	95
Tabela 14 - Quantitativo de materiais para concreto C50	96
Tabela 15 – Quantitativos da viga com fibra de carbono	96
Tabela 16 – Insumos empregados no projeto	97
Tabela 17 – Composição de custos para viga com aço	98
Tabela 18 - Composição de custos para viga com fibra	98

LISTA DE EQUAÇÕES

- (1) MOMENTO NO CENTRO DO VÃO
- (2) MOMENTO DE PROJETO MAJORADO
- (3) LIMITE INFERIOR PARA ALTURA ÚTIL
- (4) ALTURA ÚTIL
- (5) ALTURA DA LINHA NEUTRA
- (6) ÁREA DE AÇO CALCULADA
- (7) SOLICITAÇÃO DE CORTE MÁXIMA DE PROJETO
- (8) TENSÃO TANGENCIAL SOLICITANTE
- (9) TENSÃO TANGENCIAL RESISTENTE
- (10) TENSÃO TANGENCIAL DO CONCRETO
- (11) TENSÃO TANGENCIAL DO AÇO
- (12) TAXA DE ARMADURA PARA UTILIZAÇÃO DE ESTRIBOS VERTICAIS
- (13) ESPAÇAMENTO ENTRE ARMADURAS DE CORTE
- (14) ESPAÇAMENTO MÁXIMO
- (15) RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DO CONCRETO AO CISALHAMENTO
- (16) ADERÊNCIA DE CÁLCULO ENTRE ARMADURA E CONCRETO
- (17) COMPRIMENTO DE ANCORAGEM BÁSICO RETO
- (18) COMPRIMENTO DE ANCORAGEM NECESSÁRIO
- (19) COMPRIMENTO DO GANCHO DE ANCORAGEM
- (20) COMPRIMENTO TOTAL DE ANCORAGEM
- (21) CRITÉRIO DE FALHA PARA TENSÕES DE BRESLER
- (22) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BIELAS PRISMÁTICAS OU NÓS CCC
- (23) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BIELAS ATRAVESSADAS POR MAIS DE UM TIRANTE, OU NÓS CCC OU CTT
- (24) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BIELAS ATRAVESSADAS POR TIRANTE ÚNICO, OU NÓS CCT
- (25) ÁREA DE ELEMENTO DE REFORÇO NOS TIRANTES

SUMÁRIO

1. Introdução	13
1.1. Contextualização	13
1.2. Escopo do Projeto	15
1.3. Problema	16
1.4. Objetivos	16
1.5. Estrutura deste trabalho	17
2. Metodologia da Pesquisa	18
2.1. Processo de desenvolvimento de soluções inovadoras	18
2.1.1. Identificação do problema real	19
2.1.2. Definição de requisitos a serem atendidos pela solução	21
2.1.3. Formas de Energia	21
2.1.4. Definição de stakeholders	23
2.1.5. Testagem da solução desenvolvida	24
2.2. Delineamento da pesquisa	24
2.3. Coleta de dados	25
3. Dimensionamento da Estrutura	26
3.1. Dimensionamento em concreto armado convencional	26
3.1.1. Dimensionamento à flexão	26
3.1.2. Dimensionamento ao cisalhamento	30
3.1.3. Detalhamento	33
3.2. Otimização Topológica	35
3.2.1. Relatório de estrutura reforçada com aço CA50	36
3.2.2. Dimensionamento de estrutura com aço CA50	40
3.2.2.1. Verificação dos nós	41
3.2.2.2. Verificação das bielas	42
3.2.2.3. Verificação dos tirantes	42
3.2.3. Relatório de estrutura reforçada com fibra de carbono	43
3.2.4. Dimensionamento de estrutura com fibra de carbono	48
3.2.4.1. Verificação dos nós	48
3.2.4.2. Verificação das bielas	49
3.2.4.3. Verificação dos tirantes	49

4. Processo de Produção da Viga com Otimização Topológica	51
4.1. Desenvolvimento de solução inovadora	51
4.1.1. Lista de possíveis soluções	51
4.1.1.1. Processos de manufatura das Fôrmas Internas	51
4.1.1.2. Elementos resistentes à tração	55
4.1.1.3. Elementos resistentes à compressão	60
4.1.1.4. Soluções Preliminares	64
4.1.1.5. Solução Adotada	66
4.2. Processo Construtivo	68
4.2.1. Viga de Concreto Armado Convencional	68
4.2.1.1. Sistema de fôrmas	68
4.2.1.2. Montagem e posicionamento de armaduras	70
4.2.1.3. Concretagem	71
4.2.2. Viga reforçada com fibra de carbono	73
4.2.2.1. Sistema de fôrmas	73
4.2.2.2. Posicionamento da fibra de carbono	76
4.2.2.3. Concretagem	81
4.2.2.4. Desfôrma	83
5. Resultados	84
5.1. Estudo de viabilidade técnica	84
5.1.1. Ensaios	84
5.1.2. Análise dos resultados	86
5.1.3. Análise do sistema construtivo desenvolvido	90
5.2. Estudo de Viabilidade econômica	92
5.2.1. Levantamento de quantitativos	92
5.2.1.1. Viga de concreto armado	93
5.2.1.2. Viga com fibra de carbono	94
5.2.2. Composições de custo	97
5.2.3. Análise dos resultados	99
6. Conclusão	101
Referências	103
ANEXOS	108

1. Introdução

Este capítulo apresenta uma contextualização sobre o objeto do estudo realizado, o problema a ser abordado ao longo do desenvolvimento do projeto, apresentando as suas limitações com a definição do escopo, bem como os objetivos definidos e finalmente a estruturação do trabalho.

1.1. Contextualização

A construção civil é um setor econômico que, apesar de sua extensiva artesanidade, é considerada uma indústria. Diante disso, espera-se que ela apresente resultados semelhantes, em termos de produtividade, aos demais segmentos industriais. Todavia enquanto nas últimas décadas a indústria tem evoluído a passos largos, a construção ainda utiliza métodos arcaicos que eram aplicados ainda no século 19, que ancoram sua produtividade em patamares inaceitáveis para o século 21.

Soma-se a isso a questão específica da indústria brasileira. Um estudo do “Mckinsey Global Institute” apontou que, considerando o custo da mão de obra empregada e o crescimento anual do valor bruto real produzido, em vários países, o Brasil encontra-se somente a frente do México em se tratando de índices de produtividade na construção (BARBOSA et al., 2017).

Tendo em vista a reversão deste cenário, tem se observado, por parte do setor da construção civil, o interesse pelo desenvolvimento da industrialização da construção. A implementação de sistemas pré-fabricados tem aparecido com maior frequência. Estes apresentam a capacidade de reduzir o tempo de execução dos serviços e conseqüentemente aumentar a sua produtividade (Jornal do Comércio, 2017)¹.

A otimização topológica é um processo inovador que se apresenta como uma solução alternativa ao projeto realizado nas estruturas de concreto armado convencionais. Este processo é cada vez mais utilizado em outras indústrias, com

¹ Disponível em:

https://www.jornaldocomercio.com/_conteudo/2017/08/especiais/construcao_civil_2017/581591-brasil-tem-muitos-desafios-no-sistema-constructivo.html

destaque para a indústria aeronáutica. Todavia, sua aplicação na indústria da construção civil ainda apresenta diversas dificuldades, principalmente em mercados emergentes como o brasileiro.

Quanto às suas vantagens em relação às tecnologias tradicionais de estruturas de concreto, essa tecnologia apresenta a capacidade tanto de proporcionar a redução nos custos, quanto de aprimorar a qualidade. Neste modelo de processo, tem-se como produto final uma estrutura cuja geometria resista aos esforços submetidos, porém com uma redução do volume dos elementos (VETTURAZZI, 2017).

Figura 1 - Relevância da otimização topológica



Fonte: Retirado do blog Archdaily no link: <https://www.archdaily.com.br/br/906002/escola-de-arquitetura-de-aarhus-desenvolve-metodo-de-fabricacao-robotica-que-reduz-uso-de-concreto-em-70-percent>

Além da diminuição no volume das estruturas, outro fator que colabora para a redução dos custos é a redução das perdas. Na indústria em geral, mais especificamente na construção civil, existem diversos tipos de perdas. Por tratar-se de um processo direcionado à industrialização de estruturas, destaca-se, a possível redução de perdas por desperdício de materiais e por trabalhar em condições inadequadas de produção no canteiro de obras.

Os sistemas produtivos da construção civil estão imersos em dois ambientes: o ambiente competitivo – onde considerações sobre produtividade, custo e lucro são

fundamentais – e o ambiente normativo, onde as leis, normas e outros regramentos são considerados. Nos dias atuais, há uma tensão constante entre os ambientes competitivo e normativo, pois sempre se está buscando a maximização dos lucros, todavia deve-se atender às diretrizes impostas pelas normas regulamentadoras. No ponto onde há o equilíbrio entre ambos os ambientes, se depara com a inovação (AZAMBUJA, 2018)².

Produtos e processos inovadores aparecem constantemente na indústria da construção civil. Esta, comparada às demais, apresenta uma peculiaridade, que é o fato de ser tecnologicamente divergente (AZAMBUJA, 2014), o que significa que novas tecnologias são incorporadas, sem que haja o descarte das precedentes. O desenvolvimento de novas soluções tem grande importância, cujo intuito é proporcionar melhorias, visando aumentar a produtividade dos sistemas e reduzir as perdas, que, devido à artesanidade do setor, são muito elevadas.

1.2. Escopo do Projeto

Este trabalho visou o desenvolvimento de tecnologia de produção de peças pré-fabricadas submetidas a otimização topológica. Para isso, foram aplicados diversos métodos que possibilitaram a obtenção do resultado pretendido.

Tendo como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica da solução tecnológica, o trabalho realizou um comparativo do desempenho de duas vigas, uma delas de concreto armado, produzida com tecnologia convencional, e outra de concreto reforçado com fibra de carbono e otimização topológica. Ambas as vigas deveriam resistir ao mesmo carregamento, apesar de apresentar diferenças na sua geometria, devido às características dos materiais empregados e do processo de otimização.

O trabalho analisou as solicitações em viga biapoiada e, posteriormente, apresentou o dimensionamento de uma viga convencional de concreto reforçada com barras de aço. Paralelamente, utilizando o software ANSYS, definiu uma topologia otimizada para a viga de concreto que receberia reforço de fibras de carbono. Após o

² A partir de notas de aula da disciplina Inovação da Construção, curso de Engenharia Civil, UFRGS, do Prof. José Azambuja.

dimensionamento, o trabalho desenvolveu o processo construtivo envolvendo a viga com otimização topológica.

Posteriormente foram realizados ensaios com o carregamento das vigas até o seu colapso, para verificar o seu desempenho estrutural.

Após finalizada a etapa de dimensionamento estudou-se o processo de manufatura da viga com reforço de fibra de carbono com otimização topológica, já que ela utiliza tecnologias não convencionais, que ainda não possuem processos construtivos consolidados.

Também foi realizado um estudo de viabilidade econômica para a produção de elementos pré-fabricados de concreto reforçado com fibra de carbono. Finalmente, foi feita uma análise dos resultados obtidos. Todas as etapas supracitadas serão detalhadas nas seções abaixo.

1.3. Problema

O problema, a partir do qual desenvolveu-se o processo de busca por soluções inovadoras, pode ser desdobrado em dois: o primeiro refere-se à falta de conhecimento quanto ao desempenho de estruturas (no caso presente, uma viga) com otimização topológica e reforçada com fibras de carbono; o segundo está focado no processo de fabricação de elementos de concreto armado topologicamente otimizados, que ainda carecem de desenvolvimento adequado e confiabilidade nos resultados.

O problema acima descrito foi, no desenvolvimento do trabalho, definido como um problema aparente, ou seja, aquele que primeiramente se apresenta para ser resolvido. A partir desse problema aparente, foi aplicado um método de desenvolvimento de soluções que visa a obtenção da melhor solução (solução otimizada), permitindo, simultaneamente, a definição do problema real.

1.4. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de tecnologia de produção de elementos pré-fabricados de concreto submetidos à otimização topológica, ao

mesmo tempo em que busca avaliar o desempenho estrutural desses elementos. Os elementos em questão devem apresentar um desempenho estrutural semelhante às vigas de concreto armado convencional, bem como devem apresentar uma viabilidade econômica que possibilite a sua implantação.

1.5. Estrutura deste trabalho

Neste primeiro capítulo do presente trabalho foi feita a introdução do tema proposto. Nele apresentou-se uma contextualização do tema a ser desenvolvido, assim como foi identificado o escopo do projeto, seus objetivos e o problema estudado.

O segundo capítulo, por sua vez, apresenta a etapa de dimensionamento das estruturas. Este processo foi dividido em dois subcapítulos. Inicialmente é apresentado o cálculo realizado para a estrutura de concreto armado convencional, no qual estão contidas todas as etapas de cálculo e o detalhamento da viga. Em seguida, é apresentado o processo de otimização topológica da viga, onde são destacados os relatórios gerados em programa computacional para a estrutura, assim como as etapas de cálculo do dimensionamento.

O terceiro capítulo apresenta e discute o referencial bibliográfico do trabalho. Ele foi dividido em três subcapítulos. No decorrer do desenvolvimento do capítulo são apresentados o processo de desenvolvimento de solução inovadora, o processo construtivo de ambas as tecnologias estudadas, bem como o estudo de viabilidade econômica do sistema inovador desenvolvido.

O quarto capítulo destinou-se à demonstração da metodologia adotada. Nele, são apresentados o delineamento da pesquisa e a coleta de dados.

No quinto capítulo foram apresentados os resultados encontrados para as duas soluções adotadas para o problema estudado.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões relativas ao projeto desenvolvido.

2. Metodologia da Pesquisa

Neste trabalho foi estudado o desenvolvimento de tecnologia inovadora de produção de elementos pré-fabricados de concreto, reforçados com fibra de carbono e submetidos à otimização topológica. Este capítulo destinou-se a apresentar a descrição da metodologia e conceitos utilizados para abordar o problema estudado. Abaixo foram detalhados o processo adotado para o desenvolvimento de soluções inovadoras, o delineamento da pesquisa e a coleta de dados utilizados para o desenvolvimento da solução.

2.1. Processo de desenvolvimento de soluções inovadoras

O processo de desenvolvimento de soluções inovadoras inclui as atividades de pesquisa, concepção, desenvolvimento e introdução no mercado. A passagem por essas etapas resultará na produção e utilização de novos produtos e processos:

A inovação de produto consiste em modificações nos atributos dos bens ou serviços, tais como mudanças na forma como ele é percebido pelos consumidores. [...] A inovação de processo trata de mudanças no processo de fabricação do bem ou na prestação de um serviço. Não gera, necessariamente, impacto no produto final, mas produz benefícios no processo de produção, geralmente com aumentos de produtividade e/ou qualidade do produto final e redução de custos. (ABGI Group, 2018, [n.p.])³.

A inovação trata-se de uma invenção à qual atribuiu-se uma utilidade. Existem diferentes métodos para alcançar a inovação. O método de Azambuja para desenvolvimento de produtos de edificação, utilizado no desenvolvimento deste projeto, indica que o quinto paradoxo da inovação⁴ diz que “para desenvolver uma solução, o melhor é criar um problema” (AZAMBUJA, 2018). Desse modo, a partir da aplicação desta metodologia, foi executado o processo de desenvolvimento de solução que envolve as etapas que serão descritas nos subcapítulos a seguir.

³ Disponível em: <https://brasil.abgi-group.com/radar-inovacao/inovacao-tecnologica-inovacao-de-produto-x-inovacao-de-processo/>

⁴ A partir de notas de aula da disciplina Inovação da Construção, curso de Engenharia Civil, UFRGS, do Prof. José Azambuja.

Podemos classificar também como um problema do tipo “*hard*”, uma vez que apresenta uma solução ótima, a qual desejamos encontrar (AZAMBUJA, 2018).

Desse modo, utilizou-se de uma técnica de modelagem lógica que é a “Análise da Árvore de Eventos - ETA”. Trata-se de um instrumento capaz de proporcionar uma maior clareza na análise das causas e consequências do problema aparente estudado, o que possibilita realizar uma varredura pelo processo, de modo a definir o problema real (ERICSON, 2005). Dessa forma, através de pequenos passos, cobrindo todas as possibilidades de eventos ocorrentes, desenhou-se a Árvore de Eventos tanto para as causas quanto para as consequências.

Figura 3 – Árvore de eventos para as causas



Fonte: Produção própria do autor.

Figura 4 – Árvore de eventos para as consequências



Fonte: Produção própria do autor.

Após analisar a árvore de eventos, foi possível determinar os problemas reais envolvidos no processo. Segundo Azambuja (2018), o problema real é aquele que deve ser resolvido e pode, inclusive, ser o próprio problema aparente. Sendo assim, identificou-se que os problemas reais diferem do problema aparente, são eles: o posicionamento indevido de armaduras e o processo de moldagem de fôrmas.

2.1.2. Definição de requisitos a serem atendidos pela solução

O surgimento de novas tecnologias é proveniente da tensão gerada pela interação entre a necessidade de lucro e produtividade (ambiente competitivo) e a necessidade de respeitar as normas e legislação vigentes (ambiente normativo). Estes ambientes se encontram em tensão permanente e a busca por soluções satisfatórias para ambos é o que gera a inovação.

Diante disto, além das vantagens econômicas, a solução desenvolvida deve apresentar propriedades capazes de cumprir os requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014), norma que regulamenta os projetos de estruturas de concreto armado, os quais estão descritos no capítulo 5 da norma. Estão descritos abaixo as condicionantes mais relevantes ao projeto desenvolvido:

- **Quanto à capacidade resistente:** a estrutura deve apresentar segurança à ruptura.
- **Quanto ao desempenho em serviço:** deve apresentar a capacidade de manter-se em condições plenas de utilização durante sua vida útil, não podendo apresentar danos que comprometam em parte ou totalmente o uso para o qual foi projetada.
- **Quanto à durabilidade:** a estrutura deve apresentar capacidade de resistir às influências ambientais previstas e deve ser capaz de manter suas características, sem intervenções significativas, por um período mínimo de 50 anos.

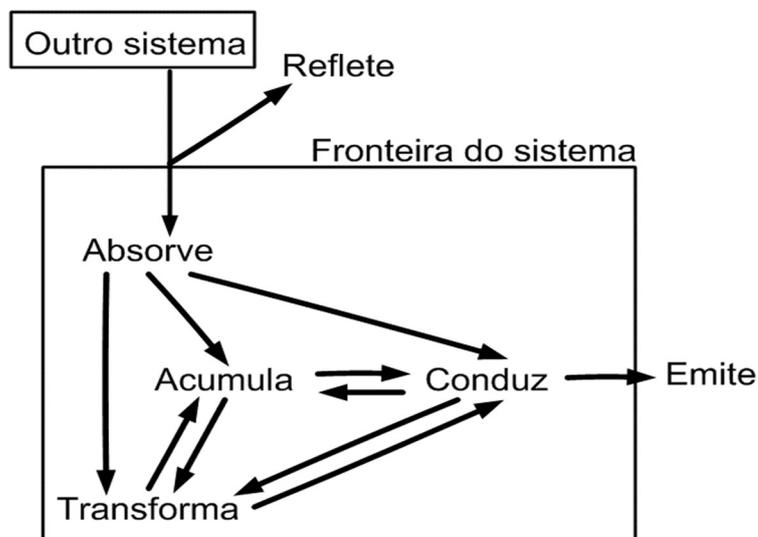
2.1.3. Formas de Energia

Para que se possa determinar a melhor solução possível para um problema de engenharia, é necessário que se considere os requisitos, funções e utilidades que se

deseja que a solução atenda. Estas propriedades estão sempre associadas à uma ou mais formas de energia e às operações energéticas.

Existem seis formas de energia distintas, são elas: atômica, eletromagnética, mecânica, química, radiante, térmica. De acordo com Azambuja (2018), as operações energéticas podem ocorrer dentro de um sistema (acumulação, condução, transformação) ou então entre sistemas distintos (emissão, absorção, reflexão).

Figura 5 – Processo Energético



Fonte: (AZAMBUJA, 2018)

Dessa forma, a partir das formas de energia associadas, é possível identificar os requisitos a serem cumpridos pela solução. São eles:

- **Energia Atômica:** não há interações importantes com essa forma de energia;
- **Energia Eletromagnética:** deseja-se que a solução apresente isolamento elétrico;
- **Energia Mecânica:** resistência às solicitações externas às quais a estrutura deve resistir;
- **Energia Química:** sistema de fôrmas internas não deverá apresentar aderência ao concreto, pois isto dificultaria o processo de desfôrma. Além disso, deve apresentar baixa porosidade, de modo que não absorva a água presente na mistura do concreto. Finalmente, deve apresentar resistência à ataques químicos;

- **Energia Radiante + Térmica:** Mecanismo deve resistir ao calor gerado pela reação de hidratação do concreto.

Segundo Azambuja (2018), a funcionalidade apresentada por um sistema é resultado de um processo energético, que surge da interação entre o corpo (matéria e informação) e as diversas formas de energia. Desse modo pode-se determinar as funções que se espera do sistema proposto como solução. São elas: precisão do sistema de fôrmas internas para que se tenha os vazios do elemento exatamente do tamanho desejado; rigidez para que o elemento possa suportar às solicitações externas; além disso o sistema de fôrmas não deve apresentar aderência ao material e também deve ter uma baixa porosidade para que o molde não absorva água do concreto.

2.1.4. Definição de stakeholders

Os stakeholders são aqueles que possuem algum interesse no projeto desenvolvido. Segundo Lorenzi (2020), cada um deles apresenta um grau diferente de influência no projeto e podem ser separados em duas categorias distintas:

- **Stakeholders primários:** “trata-se do conjunto de partes interessadas, o qual, sem a sua participação contínua, impossibilita a sobrevivência de um projeto ou corporação” (CLARKSON, 1995, p.106, tradução nossa).
- **Stakeholders secundários:** “são definidos como aqueles que influenciam ou são influenciados por um projeto ou corporação, porém não são essenciais à sua sobrevivência” (CLARKSON, 1995, p.107, tradução nossa).

No caso do projeto desenvolvido, destacam-se como principais stakeholders a indústria de estruturas pré-fabricadas de concreto, a qual pode sofrer um grande impacto, uma vez que a tecnologia inovadora desenvolvida é capaz de proporcionar inúmeras vantagens ao setor. Paralelamente, a UFRGS apresenta-se como outra parte interessada no desenvolvimento de pesquisas voltadas para a produção de tecnologias inovadoras.

Pode-se apontar, também, as empresas fornecedoras dos materiais utilizados como partes interessadas no desenvolvimento do projeto, todavia, estas apresentam uma menor influência em comparação às anteriores. Outro stakeholder que pode ser

beneficiado com o projeto, apesar de apresentarem uma baixa influência no seu desenvolvimento, são as empresas construtoras que futuramente poderão adotar o sistema construtivo desenvolvido.

2.1.5. Testagem da solução desenvolvida

Tendo como objetivo a verificação do atendimento aos requisitos impostos à tecnologia inovadora desenvolvida, a mesma deve ser submetida a ensaios capazes de reproduzir as condições para as quais a estrutura fora dimensionada. Esta etapa será detalhada no capítulo 5 deste trabalho, onde estão apresentados os ensaios e as análises dos resultados.

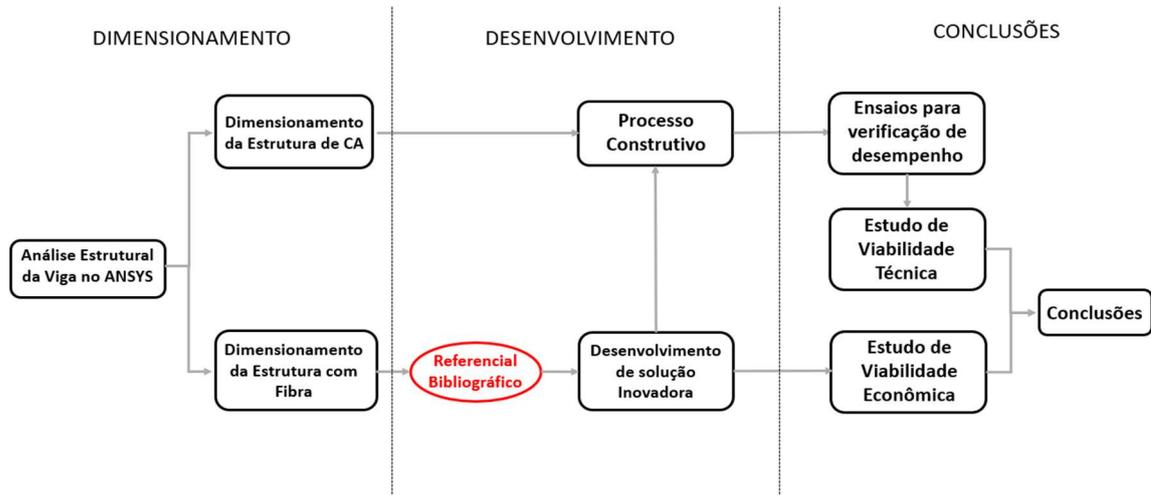
2.2. Delineamento da Pesquisa

Neste trabalho, a solução desenvolvida, para o problema estudado, foi avaliada do ponto de vista qualitativo-quantitativo, com as seguintes etapas:

- Primeiramente, foi realizado a análise estrutural e o posterior dimensionamento das estruturas de concreto armado e com fibra de carbono, visando garantir que ambas apresentassem o mesmo desempenho, tornando assim a tecnologia inovadora tecnicamente viável;
- Em segundo lugar, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados neste trabalho. Esta teve como objetivo desenvolver um processo construtivo para estruturas de concreto pré-fabricadas e definir, entre as possibilidades levantadas, a melhor solução para o problema proposto. Também foi realizado um estudo de viabilidade associado à tecnologia proposta;
- Em seguida, foram detalhados tanto o processo construtivo definido para a tecnologia inovadora proposta quanto os procedimentos adotados na manufatura da viga de concreto armado convencional;
- Por fim, realizou-se ensaios em ambos os elementos, com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural das vigas.

Estes dados são tratados individualmente e em conjunto nos próximos capítulos para que seja possível constatar a possível viabilidade do projeto.

Figura 6 – Fluxograma de atividades



Fonte: Produção própria do autor.

2.3. Coleta de Dados

Os dados foram coletados de cinco maneiras diferentes: i) Os dados apresentados no capítulo quatro foram obtidos por meio de uma revisão da literatura; ii) Os processos construtivos apresentados neste trabalho foram executados e, no caso da tecnologia inovadora, definidos pelo próprio autor; iii) Os dados obtidos nas análises estruturais das vigas com otimização topológica foram obtidos através do software ANSYS Mechanical; iv) Os dados obtidos para a realização do estudo de viabilidade estrutural foram produzidos através de ensaio realizado no LAMEF - UFRGS. v) Os dados obtidos para a realização do estudo de viabilidade econômica foram obtidos a partir de cotações feitas com fornecedores dos materiais utilizado.

3. Dimensionamento da Estrutura

O dimensionamento trata-se de uma etapa de suma importância no desenvolvimento de projetos. Durante esse processo, a engenharia possui um papel fundamental, que é o de viabilizar a otimização das soluções propostas. Nesse contexto, entende-se que a otimização é o processo de definir a melhor solução para determinada situação ou definir as condições para que a melhor solução seja obtida (AZAMBUJA, 2018).

3.1. Dimensionamento em concreto armado convencional

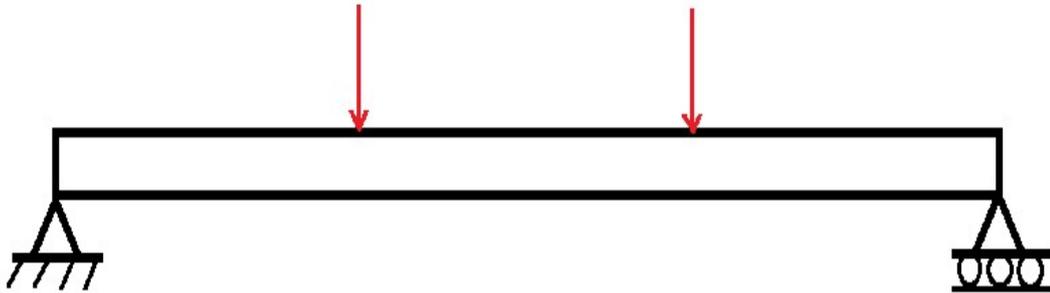
Foi realizado o dimensionamento de uma viga biapoiada de concreto armado com base nas diretrizes estipuladas pela NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2014). A viga apresenta-se no estado limite último (ELU), ou seja, no domínio de deformação 3, onde o concreto rompe ao mesmo tempo em que ocorre o escoamento do aço. Para o problema estudado, considerou-se, inicialmente, a utilização de concreto C30 e aço CA-50.

Segundo Tamayo (2018), o dimensionamento neste domínio de deformação, considerando soluções analíticas, é feito com base nas hipóteses da manutenção das seções planas, da solidariedade perfeita entre os materiais e da desconsideração da resistência à tração do concreto.

3.1.1. Dimensionamento à flexão

Foi realizado o dimensionamento de uma viga de concreto com armadura de aço, biapoiada, com duas cargas pontuais posicionadas a um terço e dois terços do comprimento do vão. A viga apresenta apoio de 1º gênero na extremidade direita e de 2º gênero na extremidade esquerda. Considerou-se uma geometria preliminar, a partir de um pré-dimensionamento, que apresentou um vão livre de 180 cm e uma seção transversal de 20 cm de altura e 15 cm de largura. As cargas apresentam valor de 22.885 N, que equivale a um momento no centro do vão de 1.922,34 KN.cm. Dimensionou-se a estrutura à flexão e ao corte atendendo aos parâmetros estipulados pela NBR 6118 – Estruturas de Concreto Armado (ABNT, 2014).

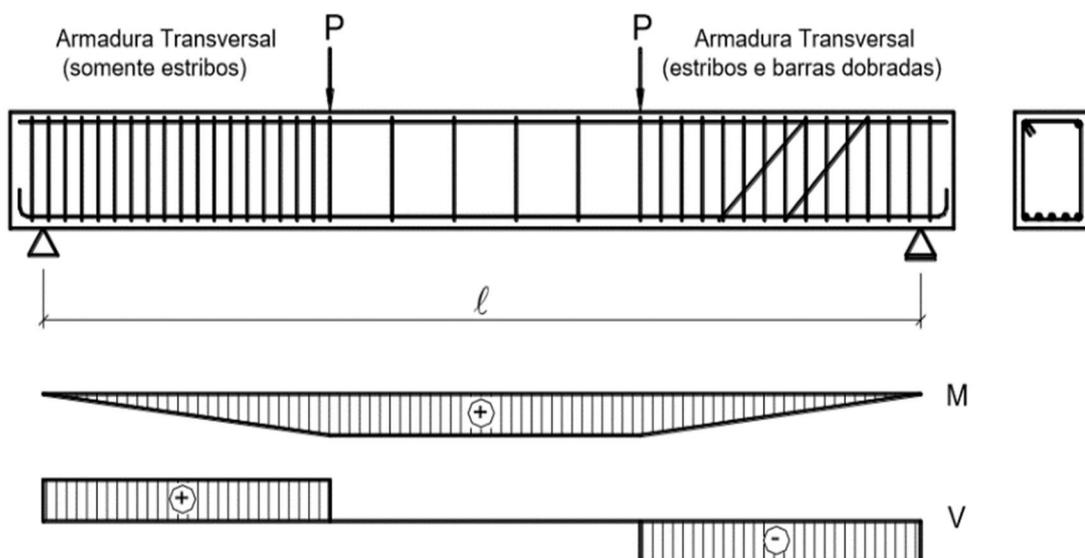
Figura 7 – Ilustração esquemática da viga biapoiada



Fonte: Ilustração elaborada pelo autor

Uma viga biapoiada deve ser dimensionada para resistir a esforços de flexão e de cisalhamento. Para tanto, a armadura deve ser adequadamente dimensionada e posicionada. Uma distribuição de ferragem adequada para resistir a esses esforços é ilustrada na figura 3 abaixo.

Figura 8 – Diagramas de uma viga biapoiada



Fonte: (LEONHARDT; MÖNNIG, 1982)

Primeiramente foi realizado o dimensionamento à flexão. Para isso, foi calculado, a partir do carregamento da estrutura, o momento máximo, que se encontra na região central da viga.

$$M_C = \left(R_A \times \frac{l}{2} \right) - \left(P \times \left(\frac{l}{2} - \frac{l}{3} \right) \right) \quad (1)$$

- R_A : reação vertical no apoio esquerdo;
- P : carga concentrada aplicada a 1/3 do comprimento do vão;
- l : comprimento entre eixos dos apoios.

$$M_C = M_{MAX} = \left(22,885 \times \frac{1,8}{2} \right) - \left(22,885 \times \left(\frac{1,8}{2} - \frac{1,8}{3} \right) \right) = 13,73 \text{ KN.m}$$

Para realizar o dimensionamento corrigiu-se o momento máximo através de um coeficiente de majoração (γ_g).

$$M_d = \gamma_g \times M_{MAX} = 1,4 \times 13,73 = 19,23 \text{ KN.m} \quad (2)$$

- M_{MAX} : momento máximo na viga;
- γ_g : coeficiente de majoração.

Para realizar o cálculo da altura útil da seção transversal, a qual representa a medida entre a linha mais comprimida e o baricentro da armadura, utilizou-se de uma estimativa prática.

$$d_{min} = 2,0 \times \sqrt{\frac{M_d}{b \times f_{cd}}} = 2,0 \times \sqrt{\frac{1922,34}{15 \times 2,143}} = 15,47 \text{ cm} \quad (3)$$

- M_d : momento de projeto (majorado);
- b : largura da viga;
- f_{cd} : resistência de cálculo do concreto.

$$d = h - 3 \text{ cm} = 17 \text{ cm} \quad (4)$$

Verificou-se que a altura útil da seção transversal é maior do que a mínima, dessa forma não se faz necessária a utilização de armadura dupla. Paralelamente, está sendo atendida a diretriz para cobrimento mínimo das armaduras, estipulado pela NBR 6118 (ABNT, 2014), para armaduras passivas com classe de agressividade II, que representam uma agressividade moderada em ambientes urbanos.

Tabela 1 – Classe de agressividade ambiental em estruturas

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

Fonte: ABNT NBR 6118:2014, Tabela 7.2

Em seguida, calculou-se a altura da linha neutra. Obteve-se dois possíveis valores, entretanto um deles foi descartado, pois apresentava-se fora da seção.

$$x = \frac{0,68 \times d \pm \sqrt{(0,68 \times d)^2 - 4 \times 0,272 \times (M_d / b \times f_{cd})}}{0,544} \quad (5)$$

$$x = \frac{0,68 \times 17 \pm \sqrt{(0,68 \times 17)^2 - 4 \times 0,272 \times (1922,34 / 15 \times 2,143)}}{0,544} = 6,03 \text{ cm}$$

- d: altura útil da seção transversal;
- M_d: momento de projeto (majorado);
- b: largura da viga;
- f_{cd}: resistência de cálculo do concreto.

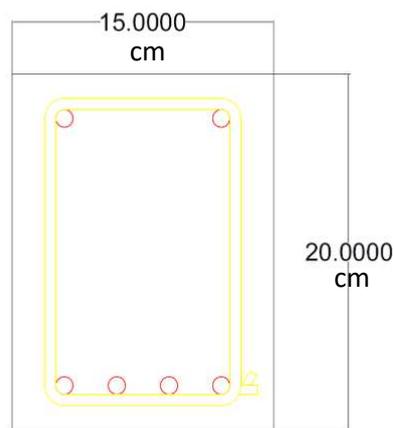
Após a obtenção do valor de altura da linha neutra, foi possível determinar a armadura longitudinal necessária para a viga. Considerando as equações de equilíbrio na altura da linha neutra, chega-se à expressão:

$$A_s = \frac{M_d}{f_{yd} \times (d - 0,4x)} = \frac{1922,34}{43,48 \times (17 - 0,4 \times 6,03)} = 3,03 \text{ cm}^2 \quad (6)$$

- M_d : momento de projeto (majorado);
- f_{yd} : resistência de cálculo do aço CA-50 (considerando coeficiente de majoração = 1,15);
- d : altura útil da seção transversal;
- x : altura da linha neutra.

Finalmente, optou-se pela utilização de 4 barras de aço CA-50 de bitola igual a 10 mm, o que representa uma área de aço efetiva de 3,14 cm². Para isso, verificou-se o espaçamento lateral mínimo entre as barras (a_h), o qual deve ser maior ou igual a 2 cm, ao diâmetro da armadura ou a 120% da dimensão do agregado, condições que foram atendidas.

Figura 9 – Detalhamento da seção transversal



4 Ø 10 mm

Fonte: Ilustração elaborada pelo autor

3.1.2. Dimensionamento ao cisalhamento

Em seguida, realizou-se o dimensionamento às solicitações de cisalhamento presentes na estrutura. Para isso, foi calculado, a partir do carregamento, a força cortante máxima, que se encontra na região das extremidades da estrutura.

$$V_{sd} = 1,4 \times V_{MAX} = 1,4 \times 22,85 = 32,04 \text{ KN} \quad (7)$$

Para o dimensionamento ao corte, utilizou-se o Modelo de cálculo I, o qual admite as diagonais de compressão com uma inclinação de 45° e o valor da força

cortante constante ao longo do vão. Primeiramente realizou-se a verificação da biela comprimida.

$$\tau_{Sd} = \frac{1,4 \times V_{sd}}{b \times d} = \frac{1,4 \times 32,04}{15 \times 17} = 0,126 \text{ kN/cm}^2 \quad (8)$$

- τ_{Sd} : tensão tangencial solicitante de cálculo;
- V_{sd} : força cortante solicitante de cálculo;
- b : largura da viga;
- d : altura útil da seção transversal.

$$\tau_{Rd2} = 0,27 \times \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \times f_{cd} = 0,27 \times \left(1 - \frac{30}{250}\right) \times 2,143 = 0,509 \text{ kN/cm}^2 \quad (9)$$

- τ_{Rd2} : tensão tangencial resistente;
- f_{ck} : resistência característica do concreto;
- f_{cd} : resistência de cálculo do concreto.

Dessa forma, pode-se verificar que a condição imposta, de que a tensão tangencial solicitante deve ser menor que a tensão tangencial resistente, foi atendida. Parte-se, então, para a verificação da biela tracionada.

$$\tau_{Sd} \leq \tau_c + \tau_{sw}$$

$$\tau_{sw} = \tau_{Sd} - \tau_c$$

$$\tau_c = 0,6 \times f_{ctd} = 0,6 \times \left(0,15 \times f_{ck}^{2/3}\right) = 0,6 \times \left(0,15 \times 30^{2/3}\right) = 0,869 \text{ MPa} \quad (10)$$

- τ_{Sd} : tensão tangencial solicitante de cálculo;
- τ_c : parcela da tensão tangencial resistida pelo concreto;
- τ_{sw} : parcela da tensão tangencial resistida pelo aço;
- f_{ctd} : resistência de cálculo do concreto ao cisalhamento;
- f_{ck} : resistência característica do concreto.

A partir do valor calculado para τ_c e do valor já conhecido de τ_{Sd} , pode-se determinar o valor de τ_{sw} .

$$\tau_{sw} = 1,256 - 0,869 = 0,387 \text{ MPa} \quad (11)$$

Considerou-se, então, que a viga receberia uma armadura de cisalhamento composta de estribos verticais (inclinação de 90° em relação à armadura longitudinal). Sendo assim, calcula-se a taxa de armadura para estribos verticais.

$$\rho_{sw,90} = \frac{1,11 \times \tau_{sw}}{f_{ywd}} = \frac{1,11 \times 0,387}{500/1,15} = 9,89 \times 10^{-4} \quad (12)$$

- $\rho_{sw,90}$: taxa de armadura resistente ao cisalhamento com inclinação de 90°;
- τ_{sw} : parcela da tensão tangencial resistida pelo aço;
- f_{ywd} : tensão na armadura transversal.

Em seguida, com a finalidade de determinar os espaçamentos entre os estribos, arbitram-se as áreas de aço. Optou-se pela utilização de estribo simples, com 2 ramos.

$$\phi t = 6,3 \text{ mm} \rightarrow A_{sw} = 0,32 \text{ cm}^2$$

$$\rho_{sw,90} = \frac{A_{sw}}{b \times s} \rightarrow 9,89 \times 10^{-4} = \frac{2 \times 0,32}{15 \times s} \quad (13)$$

$$s = 41,78 \text{ cm}$$

Deve-se verificar os espaçamentos entre elementos da armadura transversal máximo e mínimo. O espaçamento mínimo, o qual deve ser suficiente para a passagem do vibrador, apresenta valor igual a 7 cm, para que se possa garantir um bom adensamento. Por outro lado, o espaçamento máximo deve atender às seguintes condições:

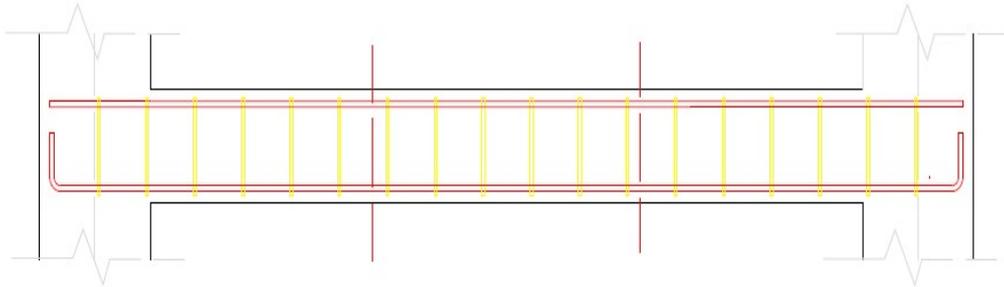
$$\text{Como } V_{sd} \leq 0,67 \times V_{Rd2}:$$

$$S_{m\acute{a}x} \leq 0,6 \times d \leq 30 \text{ cm} = 0,6 \times 17 = 10,20 \text{ cm} \quad (14)$$

- V_{sd} : força cortante solicitante de cálculo;
- V_{Rd2} : força cortante resistente de cálculo;
- $S_{m\acute{a}x}$: espaçamento máximo;
- d : altura útil da seção transversal.

Desse modo, adotou-se um espaçamento constante entre os estribos, considerando a etapa construtiva, de valor igual a 10 cm.

Figura 10 – Detalhamento da seção longitudinal



Fonte: Ilustração elaborada pelo autor

3.1.3. Detalhamento

Finalmente foi feito o detalhamento da estrutura. Primeiramente foi calculado o comprimento de ancoragem reto básico.

$$f_{ctd} = \frac{0,21 \times f_{ck}^{2/3}}{1,4} = \frac{0,21 \times 30^{2/3}}{1,4} = 1,448 \text{ MPa} \quad (15)$$

Para realizar o cálculo de f_{bd} , são utilizados os seguintes valores para os parâmetros η_1 , η_2 , η_3 :

- η_1 : 2,25 para barras nervuradas;
- η_2 : 1 para situação de boa aderência;
- η_3 : 1 para barras de bitola inferior a 32 mm.

$$f_{bd} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times f_{ctd} = 2,25 \times 1 \times 1 \times 1,448 = 3,258 \text{ MPa} \quad (16)$$

$$l_b = \frac{\phi}{4} \times \frac{f_{yd}}{f_{bd}} = \frac{1}{4} \times \frac{434,78}{3,258} = 33,36 \text{ cm} \quad (17)$$

- l_b : comprimento de ancoragem básico reto;
- ϕ : diâmetro (bitola) do aço;
- f_{yd} : resistência de cálculo do aço CA-50;
- f_{bd} : tensão última de aderência.

A partir do comprimento de ancoragem básico reto, detalha-se o gancho. O valor de $l_{b,nec}$ deve ser maior ou igual a 30% do comprimento de ancoragem básico, a 10 vezes o diâmetro da bitola da armadura longitudinal ou a 10 cm. Considera-se α_1 igual a 0,7 para barras tracionadas com gancho.

$$l_{b,nec} = \alpha_1 \times l_b \times \frac{A_{s,cal}}{A_{s,EF}} = 0,7 \times 33,36 \times \frac{3,03}{3,14} = 22,50 \text{ cm} \quad (18)$$

- α_1 : efeito de gancho ou laços.
- l_b : comprimento de ancoragem básico reto;
- $A_{s,cal}$: área de aço calculada;
- $A_{s,EF}$: área de aço efetiva;

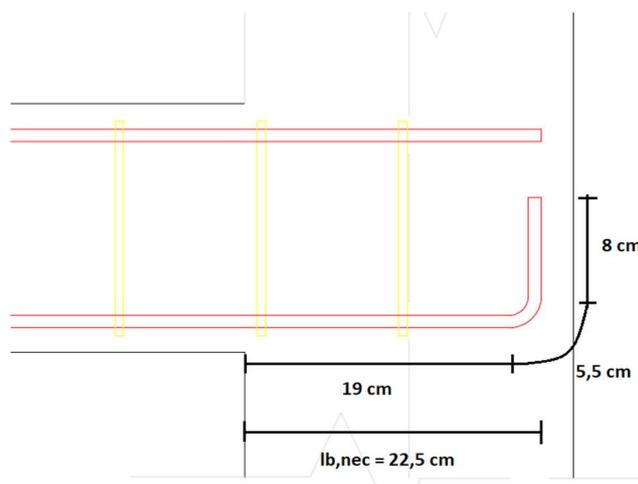
Finalmente detalha-se os comprimentos do gancho e o comprimento total de ancoragem.

$$l_g = 8\phi + \frac{2\pi \times (2,5\phi + \phi)}{4} = 13,5\phi = 13,5 \text{ cm} \quad (19)$$

$$l_T = l_g + l_{b,nec} - (2,5\phi + \phi) = 32,50 \text{ cm} \quad (20)$$

- l_g : comprimento do gancho de ancoragem;
- l_T : comprimento total de ancoragem;
- $l_{b,nec}$: comprimento de ancoragem necessário;
- ϕ : diâmetro (bitola) do aço.

Figura 11 – Detalhamento do gancho



Fonte: Ilustração elaborada pelo autor

3.2. Otimização Topológica

Foi realizada a otimização topológica de viga biapoiada de concreto reforçado com fibras contínuas de carbono. Para possibilitar a realização da análise de tensões utilizando o software disponível, foi adotada uma simplificação dos materiais. Foram criados dois modelos de material. O primeiro possui a resistência à compressão do concreto e a resistência à tração do aço-carbono. O segundo também possui a resistência à compressão do concreto, mas possui a resistência à tração da fibra de carbono. Com esses modelos de materiais evita-se ter que realizar a análise não linear discretizada com barras de aço ou fibras de carbono, combinadas com concreto (AMIR, 2012). Assim, supõe-se um material homogêneo, cujas propriedades, quando submetido a esforços de compressão, são iguais ao do concreto C30 e quando submetido à tração apresenta comportamento do material resistente (barra de aço ou fibra de carbono).

Figura 12 – Processo de otimização realizado



Fonte: Ilustração elaborada pelo autor

Como no modelo discutido em 3.1, a viga otimizada apresenta as mesmas dimensões externas da viga de concreto armado convencional. No processo de otimização foi utilizado o método dos elementos finitos para a realização de uma análise elástica linear. O tamanho do elemento finito considerado foi de 1cm x 1cm. No total, obteve-se 3600 elementos (180x20) de 4 nós, isoparamétrico. As cargas verticais, de módulo igual a 22.885 N, foram aplicadas a 1/3 e 2/3 do vão e geram um momento no centro do vão de 1922,34 kN.cm.

Foi adotado o critério de falha para tensões de Bresler-Pister⁵ (BRESLER; PISTER, 1958) para falha de tensões, no qual:

$$\sigma_{eq} = (3J_2)^{0.5} \leq c_0 + c_1 \times I_1 + c_2 + I_1^2 \quad (21)$$

I_1 é o primeiro invariante do tensor de tensões ($I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) e c_0 , c_1 e c_2 são constantes do material função de f_c , f_t e f_b (resistência à compressão biaxial).

Os relatórios a seguir foram elaborados com o auxílio do Prof. Herbert M. Gomes do departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS.

3.2.1. Relatório de estrutura reforçada com aço CA50

- **Materiais:**

Foram utilizadas na otimização as seguintes propriedades dos materiais:

$$E_c = 3,3 \times 10^{10} \text{ Pa};$$

$$E_s = 2,1 \times 10^{11} \text{ Pa};$$

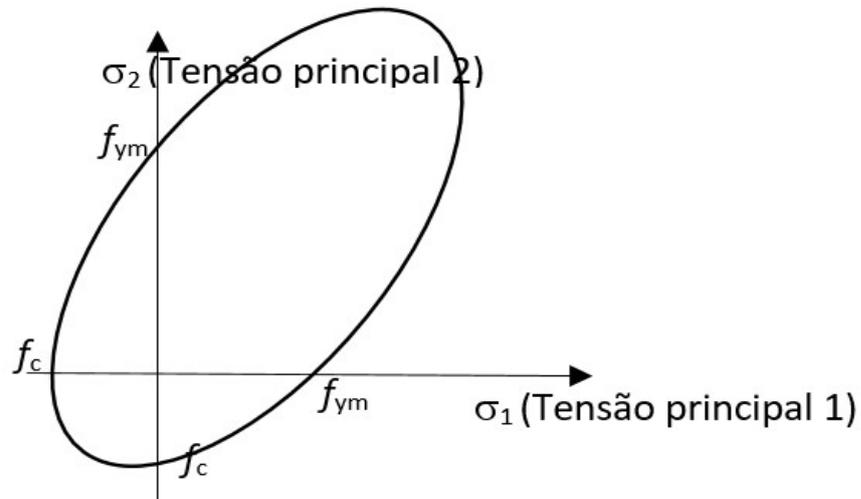
$$f_c = 30 \times 10^6 \text{ Pa};$$

$$f_t = 3 \times 10^6 \text{ Pa (desprezado e trocado por } f_y = 500 \times 10^6 \text{ Pa, do CA-50).}$$

A tensão limite de tração do aço, de $f_y = 500 \text{ MPa}$, é ajustada para $f_{y\text{mod}} = f_y \times E_c/E_s = 78.57 \text{ MPa}$, de forma a utilizar apenas um só material com $E = E_c$. Desta forma, para as tensões principais de tração listadas e obtidas aqui nesta análise, deve-se corrigir para $\sigma_1 \times E_s/E_c$ para se ter as reais tensões no material tracionado. A premissa é válida para a obtenção da topologia otimizada da estrutura, no entanto, para que não ocorra o superdimensionamento do elemento, na etapa de dimensionamento deve-se utilizar o valor encontrado para $f_{y\text{mod}}$.

⁵ O critério de falha de tensões de Bresler-Pister é uma função que foi originalmente concebida para prever a resistência do concreto sob estados de tensão multiaxial. Este critério de falha de tensões é uma extensão do critério de falha de tensões de Drucker-Prager.

Figura 13 – Superfície de falha para o concreto-aço



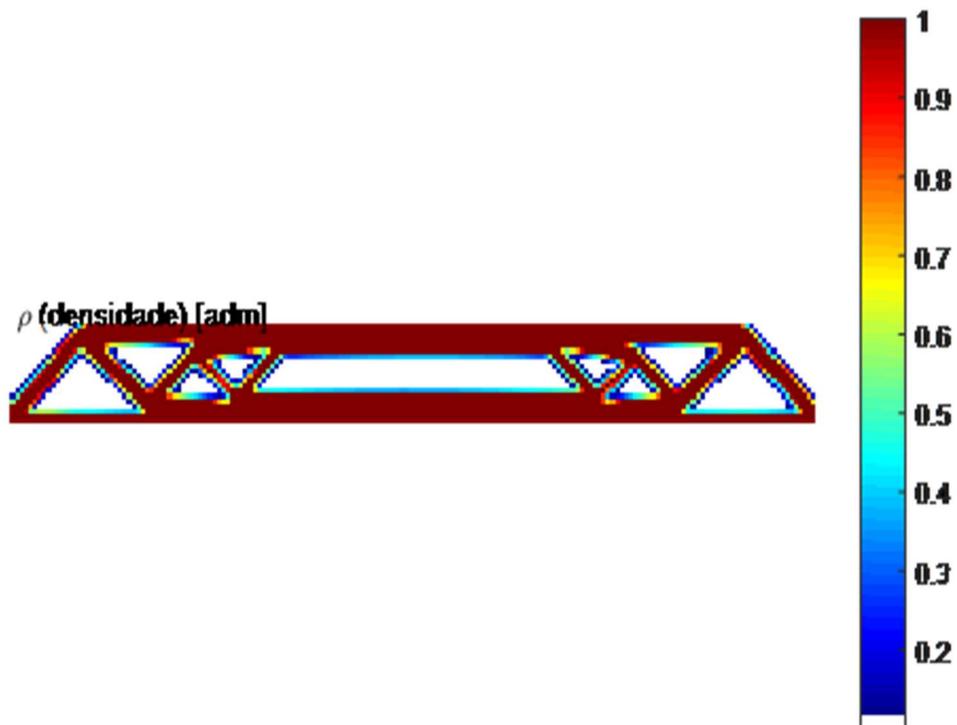
Fonte: Ilustração própria do autor.

- **Resultados:**

- Densidade:

A máxima redução de volume alcançada foi de 64% do volume inicial. A densidade varia entre 0 e 1, onde 1 representa o espaço ocupado por concreto ou aço e 0 representa os espaços vazios do elemento.

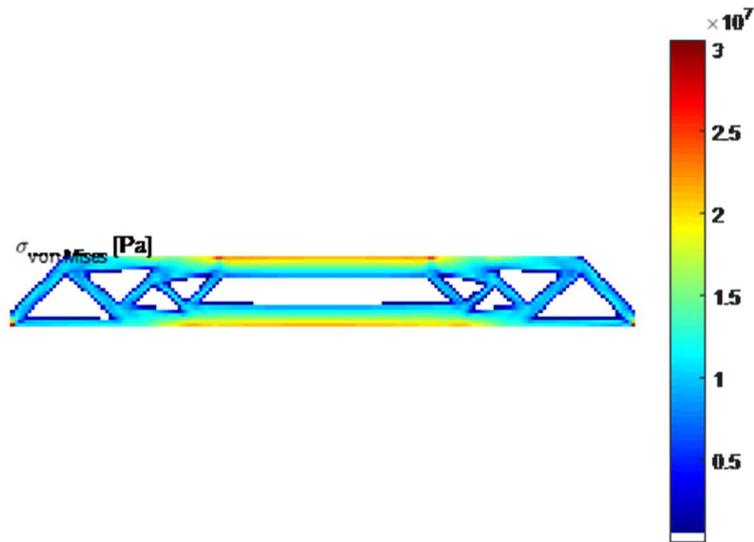
Figura 14 – Densidade final do material



Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

- Tensão de Von Mises:

Figura 15 - Tensões de von Mises [Pa] $(3J_2)^{0,5}$

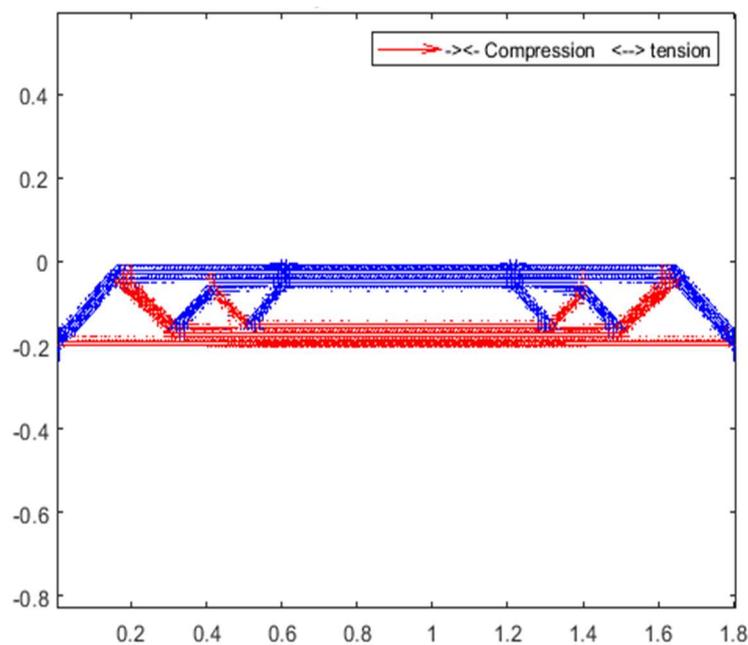


Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

- Direções principais de tração e compressão:

A representação gráfica abaixo demonstra as direções principais que apontam os locais onde a estrutura está solicitada à tração, em vermelho, e à compressão, na coloração azul.

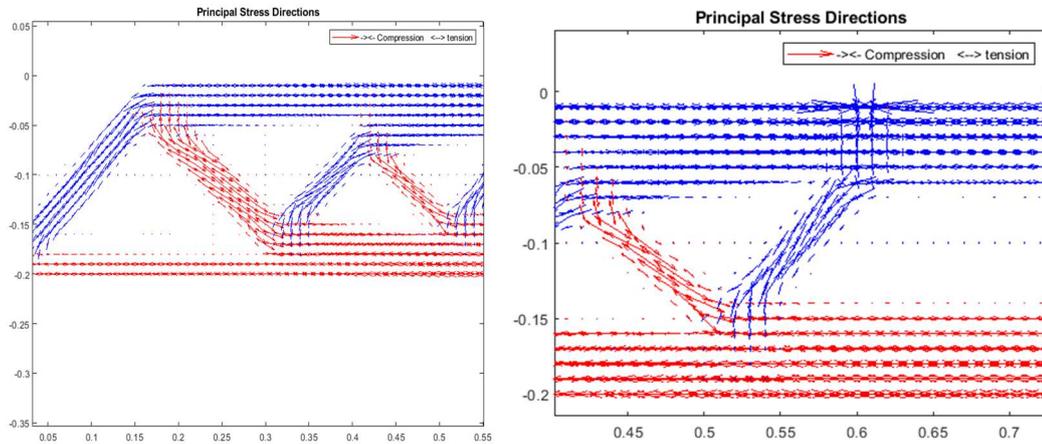
Figura 16 – Direções principais das solicitações



Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

Em seguida, foi representado o detalhamento do estado de tensões principais nas regiões nodais da viga.

Figura 17 – Detalhamento dos nós

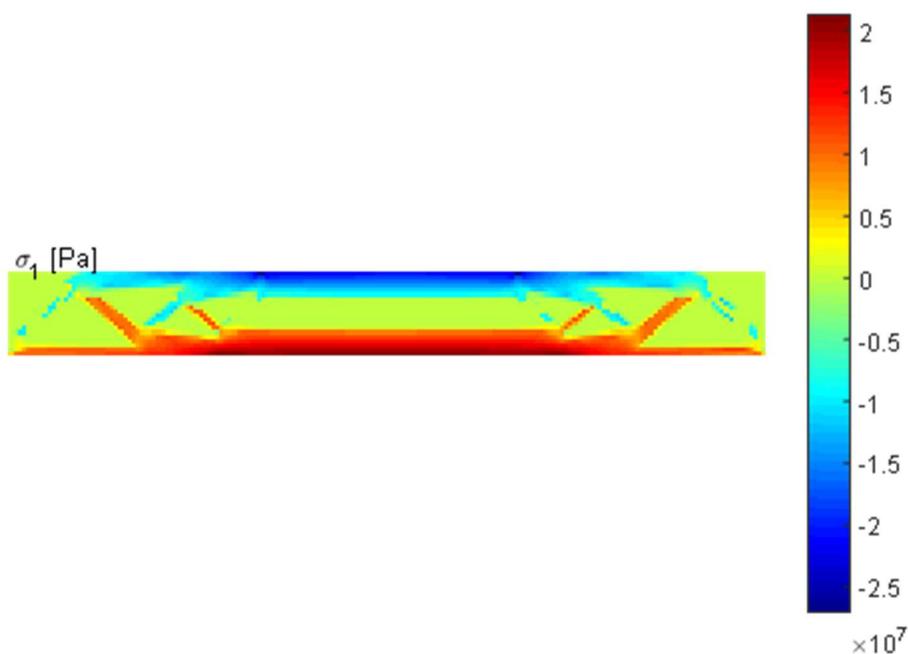


Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

➤ Tensões Principais 1:

O valor indicado para os tirantes é de 20 MPa, corrigindo-o, chega-se a 127 MPa. Na biela comprimida superior, onde terá concreto, obteve-se um valor de 25 MPa. Este valor é diferente dos $f_c = 30$ MPa devido aos efeitos dos esforços na biela superior não ser puramente de compressão, mas haver também compressão biaxial.

Figura 18 – Tensões principais 1 [Pa]



Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

➤ Tensões Principais 2:

O valor indicado é, para os esforços de compressão, de 25 MPa próximos aos apoios, devido ao apoio pontual, todavia nas bielas este valor é menor e chega a 12 MPa.

O algoritmo retira material até o limite em que ou o concreto ou o aço atinge o seu limite da superfície de falha. Neste caso, o algoritmo deixou de retirar material porque o concreto nos apoios atingiu a superfície de falha.

A partir desta análise, identifica-se que a armadura não escoará na carga limite aplicada, diferente da premissa adotada para a estrutura de concreto armado convencional, onde assume-se um domínio x/d de modo que a armadura está em escoamento.

Figura 19 – Tensões principais 2 [Pa]



Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

3.2.2. Dimensionamento de estrutura com aço CA-50

Após a definição da topologia otimizada para a estrutura, procedeu-se para a etapa de dimensionamento. Este foi realizado através do método das bielas e dos tirantes, apresentado na seção 22.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014). Nela, estão definidos os parâmetros de resistência de cálculo das bielas e regiões nodais, assim como dos tirantes.

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), para a verificação de tensões de compressão máximas nas bielas e regiões nodais, são definidos os seguintes parâmetros:

$$f_{cd1} = 0,85 \alpha_{v2} f_{cd} \text{ (bielas prismáticas ou nós CCC)} \quad (22)$$

$$f_{cd2} = 0,60 \alpha_{v2} f_{cd} \text{ (bielas atravessadas por mais de um tirante, ou nós CCC ou CTT)} \quad (23)$$

$$f_{cd2} = 0,72 \alpha_{v2} f_{cd} \text{ (bielas atravessadas por tirante único, ou nós CCT)} \quad (24)$$

Ainda, a área de aço a ser aplicada em cada tirante é dada por:

$$A_s = \frac{F_{sd}}{f_{yd}}, \quad (25)$$

onde F_{sd} representa o valor de cálculo da força de tração determinada no tirante.

3.2.2.1. Verificação dos Nós

Os nós da estrutura foram identificados quanto à sua tipologia e em seguida verificados. Em alguns dos nós apareceram tensões de tração. Estas, por sua vez, são absorvidas pela armadura de aço. A armadura, ao entrar no nó, torna-o comprimido. Pode-se observar que, na tabela abaixo, por questão de convenção, os nós submetidos aos esforços de compressão estão indicados com o sinal negativo, enquanto os submetidos à tração apresentam sinal positivo.

Tabela 2 – Verificação dos nós da viga com aço CA-50

Nós			
Elemento	Tipo	Tensão [KN/cm ²]	Verificação
N1	CCT	0,50	OK
N2	CCT	-1,00	OK
N3	CTT	0,75	OK
N4	CCT	-0,75	OK
N5	CTT	1,25	OK
N6	CCC	-1,50	OK
N7	CCC	-1,50	OK
N8	CTT	1,25	OK
N9	CCT	-0,75	OK
N10	CTT	0,75	OK
N11	CCT	-1,00	OK
N12	CCT	0,50	OK

Fonte: Produção própria do autor.

3.2.2.2. Verificação das Bielas

Analogamente aos nós, identificou-se a tipologia das bielas e em seguida realizou-se a sua verificação. Na biela superior, na região central da viga, ocorreu a maior tensão de compressão, a qual superou a capacidade do elemento. Desse modo, aumentou-se o f_{ck} do concreto utilizado para 50 MPa de modo a atender à resistência especificada, uma vez que, conforme está apontado nas equações (22), (23) e (24), a NBR 6118 (ABNT, 2014) indica a utilização de coeficientes que reduzem a resistência do concreto nos elementos.

Tabela 3 – Verificação das bielas da viga com aço CA-50

Bielas (Compressão)				
Elemento	Tensão Solicitante [KN/cm ²]	Tensão Resistente [KN/cm ²]	Área da Seção Transversal [cm ²]	Verificação
B1	0,75	1,71	56,25	OK
B2	1,00	1,71	65,70	OK
B3	0,75	1,71	46,95	OK
B4	1,25	2,06	93,75	OK
B5	0,75	1,71	43,20	OK
B6	2,25	2,43	78,75	OK
B7	0,75	1,71	43,20	OK
B8	1,25	2,06	93,75	OK
B9	0,75	1,71	46,95	OK
B10	1,00	1,71	65,70	OK
B11	0,75	1,71	56,25	OK

Fonte: Produção própria do autor.

3.2.2.3. Verificação dos Tirantes

Finalmente realizou-se a verificação dos tirantes da estrutura. Para isso, utilizou-se o critério de falha de von Mises, uma vez que este é o critério melhor aplicável a materiais dúcteis, como é o caso dos metais. Antes da ocorrência do escoamento do material assume-se que ele apresenta comportamento elástico (Wikipédia, 2016). Através da topologia da viga, estimou-se a área das seções transversais dos tirantes, para que se pudesse determinar a força de tração neles

solicitada. Finalmente, pôde-se determinar a área de aço necessária em cada um dos tirantes.

Tabela 4 – Dimensionamento dos tirantes da viga com aço CA-50

Tirantes (Tração)						
Elemento	Tensão Solicitante [KN/cm ²]	A,seção [cm ²]	Força [KN]	f _{yd} [KN/cm ²]	A _{s,nec} [cm ²]	A _{s,ef} [cm ²]
T1	1,25	26,85	33,56	43,478	0,77	1 φ 10 mm
T2	1,00	65,70	65,70	43,478	1,51	2 φ 10 mm
T3	1,30	77,25	100,43	43,478	2,31	3 φ 10 mm
T4	1,00	32,25	32,25	43,478	0,74	1 φ 10 mm
T5	1,75	97,20	170,10	43,478	3,91	5 φ 10 mm
T6	1,00	32,25	32,25	43,478	0,74	1 φ 10 mm
T7	1,30	77,25	100,43	43,478	2,31	3 φ 10 mm
T8	1,00	65,70	65,70	43,478	1,51	2 φ 10 mm
T9	1,25	26,85	33,56	43,478	0,77	1 φ 10 mm

Fonte: Produção própria do autor.

3.2.3. Relatório de estrutura reforçada com fibra de carbono

- **Materiais:**

Foram utilizadas na otimização as seguintes propriedades dos materiais:

$$E_c = 3,3 \times 10^{10} \text{ Pa};$$

$$E_y = 3,15 \times 10^{11} \text{ Pa (Fibra de Carbono);}$$

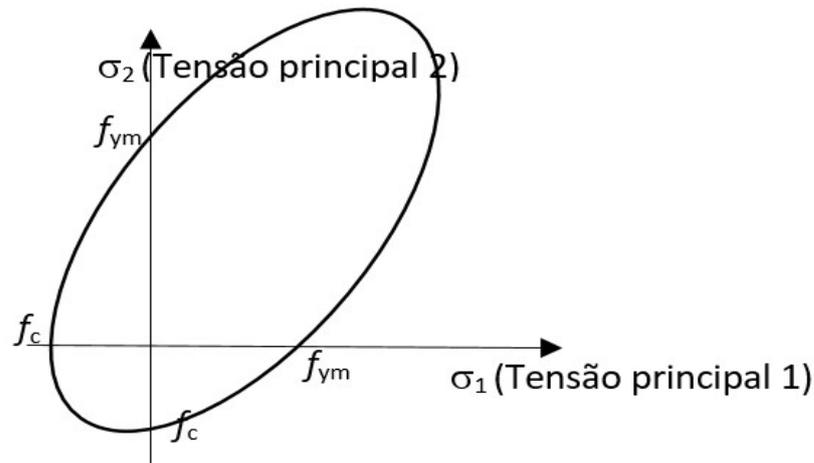
$$f_c = 30 \times 10^6 \text{ Pa};$$

$f_t = 3 \times 10^6 \text{ Pa}$ (desprezado), trocado por $f_y = 3530 \times 10^6 \text{ Pa}$ (Resistência nominal da fibra de carbono).

A tensão limite de tração da fibra de carbono, de $f_y = 3530 \text{ MPa}$, é ajustada para $f_{y\text{mod}} = f_y \times E_c / E_y = 3,53 \times 10^8 \text{ Pa}$, de forma a utilizar apenas um só material com $E = E_c$. Desta forma, para as tensões principais de tração listadas e obtidas aqui nesta análise, deve-se corrigir para $\sigma_1 \times E_y / E_c$ para se ter as reais tensões no material tracionado. Analogamente ao caso da viga reforçada com aço CA-50, a premissa é

válida para a obtenção da topologia otimizada da estrutura, no entanto, para que não ocorra o superdimensionamento do elemento, na etapa de dimensionamento deve-se utilizar o valor encontrado para f_{ymod} .

Figura 20 – Superfície de falha para o concreto-fibra



Fonte: Ilustração própria do autor.

- **Resultados:**

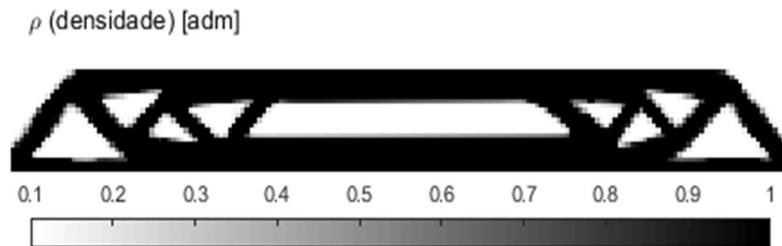
- Densidade:

O software Ansys dimensionou a viga com uma densidade que variava entre 0 e 1, onde 1 representa a máxima densidade do material (concreto ou fibra de carbono) e 0 representa os espaços vazios do elemento. A máxima redução de volume alcançada no software foi de 71% do volume inicial. Esta geometria inicial foi copiada para o software AutoCAD, entretanto a densidade do material no AutoCAD não poderia ser variável. Assim, como foi utilizado apenas uma densidade de concreto e uma densidade de fibra, os valores entre 0 e 1 colapsam nesses dois valores extremos, tornando a geometria dicotômica (dois estados; com ou sem matéria). Isso permitiu a execução da viga com uma especificação de concreto e uma especificação de fibra de carbono.

A conformação dos traços que delimitavam a fronteira entre as regiões com e sem material foi realizada visando a segurança do elemento. Desse modo, foram previstas seções maiores do que as indicadas no processo de otimização topológica realizada no software Ansys. Sendo assim, na configuração final, foi removido apenas 40% do volume inicial da viga com seção retangular. Cabe ainda ressaltar que a fibra de carbono, por apresentar resistência à corrosão e a ataques químicos, não necessita de recobrimento de proteção. Desse modo, pode-se reduzir ainda mais as

seções nas regiões dos tirantes. Foi possível reduzir significativamente as seções das regiões dos tirantes em comparação com as seções que seriam necessárias caso fosse utilizado aço-carbono. A única função do concreto nessas seções foi manter a fibra de carbono posicionada corretamente.

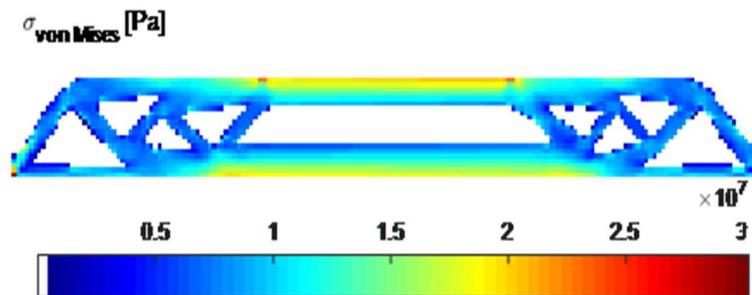
Figura 21 – Densidade final da viga com fibra de carbono



Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

➤ Tensão de Von Mises:

Figura 22 - Tensões de von Mises [Pa] $(3J_2)^{0,5}$

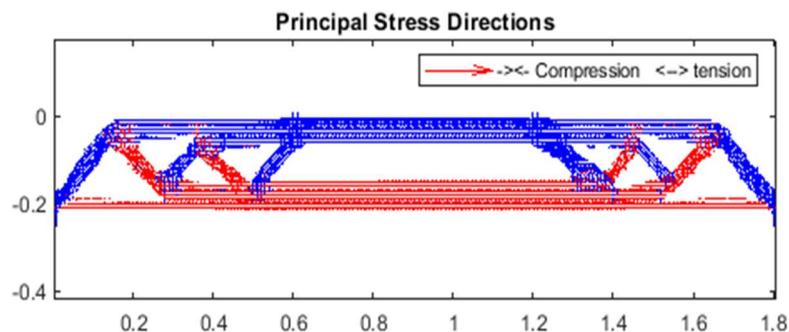


Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

➤ Direções principais de tração e compressão:

A representação gráfica abaixo demonstra as direções principais que apontam os locais onde a estrutura está solicitada à tração, em vermelho, e à compressão, na coloração azul.

Figura 23 - Direções principais das solicitações

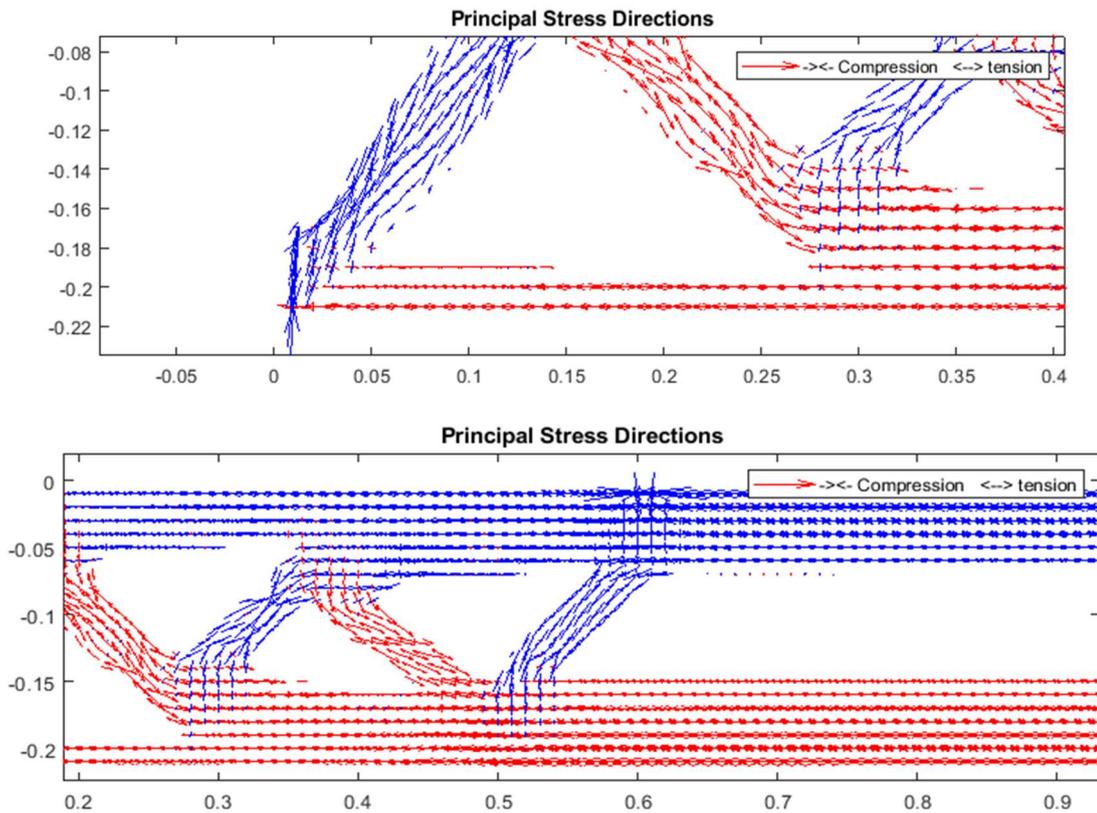


Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

Pode-se observar na figura 23, onde pode-se visualizar a topologia definida para o software, que a viga assumiu uma assinatura característica de treliça nas suas extremidades. Isso ocorreu, pois existem esforços de cisalhamento nessas regiões e, para que esses possam ser transmitidos, é necessário que haja o posicionamento das barras nessas regiões. Por outro lado, na região central, onde há somente flexão pura, a viga assumiu uma forma típica de viga de Vierendeel.

Em seguida, foi representado o detalhamento do estado de tensões principais nas regiões nodais da viga.

Figura 24 - Detalhamento dos nós

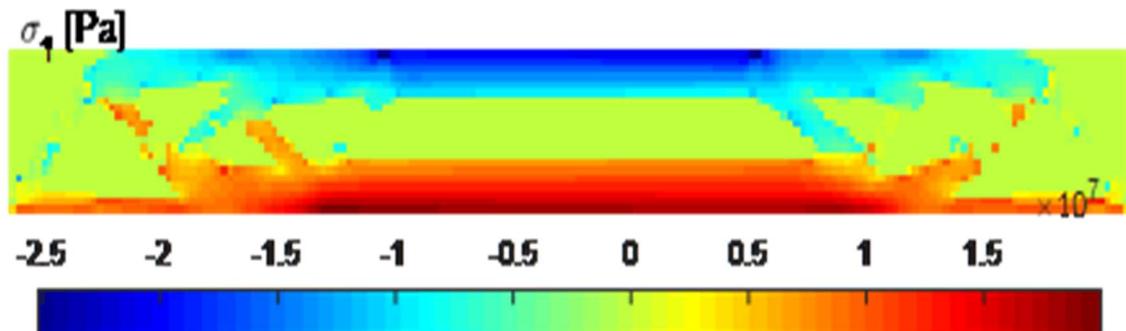


Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

- Tensões Principais 1:

O valor indicado para os tirantes é de 20 MPa, corrigindo-o, chega-se a 191 MPa. Na biela comprimida superior, onde o concreto está atuando, obteve-se um valor de 25 MPa. Este valor é diferente dos $f_c = 30$ MPa devido aos efeitos dos esforços na biela superior não serem puramente de compressão, mas haver também compressão biaxial.

Figura 25 - Tensões principais 1 [Pa]



Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

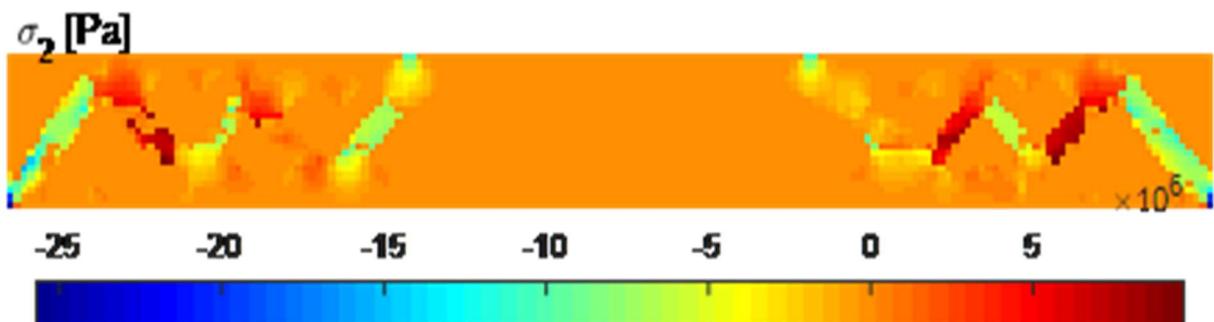
- Tensões Principais 2:

O valor indicado, para os esforços de compressão, é de 25 MPa próximos aos apoios. Entretanto, devido ao apoio pontual, nas bielas este valor é menor e chega a 15 MPa.

O Algoritmo retira material até o limite em que ou o concreto ou a fibra atinge o seu limite da superfície de falha. Neste caso, o algoritmo deixou de retirar material porque o concreto presente nos apoios, assim como próximo aos pontos de aplicação das cargas, atingiu a superfície de falha. A fibra de carbono ainda não havia atingido a superfície de falha.

Por esta análise, a fibra não escoará na carga limite aplicada, diferente da premissa adotada para a estrutura de concreto armado convencional, onde assume-se um domínio x/d de modo que a armadura está em escoamento.

Figura 26 - Tensões principais 2 [Pa]



Fonte: Ilustração própria, produzida pelo software ANSYS.

3.2.4. Dimensionamento de Estrutura com Fibra de Carbono

Analogamente à estrutura reforçada com aço CA-50, após a definição da topologia otimizada para a estrutura, procedeu-se para a etapa de dimensionamento. Este foi realizado através de uma adaptação do método das bielas e dos tirantes, apresentado na seção 22.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014). Nela, estão definidos os parâmetros de resistência de cálculo das bielas e regiões nodais, assim como dos tirantes, vide equações (22), (23), (24), (25).

3.2.4.1. Verificação dos Nós

Os nós da estrutura foram identificados quanto à sua tipologia e em seguida verificados. Em alguns dos nós apareceram tensões de tração. Estas, por sua vez, são absorvidas pelo elemento resistente à tração. A fibra, ao entrar no nó, torna-o comprimido. Pode-se observar que, na tabela abaixo, por questão de convenção, os nós submetidos aos esforços de compressão estão indicados com o sinal negativo, enquanto os submetidos à tração apresentam sinal positivo.

Tabela 5 - Verificação dos nós da viga com fibra

Nós			
Elemento	Tipo	Tensão [KN/cm ²]	Verificação
N1	CCT	1,00	OK
N2	CCT	-0,75	OK
N3	CTT	0,75	OK
N4	CCT	-0,75	OK
N5	CTT	1,25	OK
N6	CCC	-1,50	OK
N7	CCC	-1,50	OK
N8	CTT	1,25	OK
N9	CCT	-0,75	OK
N10	CTT	0,75	OK
N11	CCT	-0,75	OK
N12	CCT	1,00	OK

Fonte: Produção própria do autor.

3.2.4.2. Verificação das Bielas

Analogamente aos nós, identificou-se a tipologia das bielas e em seguida realizou-se a sua verificação. Observou-se que a biela 6, localizada na região central da viga, não atendia os requisitos estabelecidos pelo método. Desse modo, aumentou-se a resistência característica do concreto para 50 MPa. Considerando tal valor, passou-se a atender os requisitos de projeto da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 6 - Verificação das bielas da viga com fibra

Bielas (Compressão)				
Elemento	Tensão Solicitante [KN/cm ²]	Tensão Resistente [KN/cm ²]	A, seção [cm ²]	Verificação
B1	0,50	1,71	58,50	OK
B2	0,75	1,71	76,95	OK
B3	0,50	1,71	52,95	OK
B4	1,25	2,06	100,95	OK
B5	0,50	1,71	51,30	OK
B6	2,00	2,43	89,25	OK
B7	0,50	1,71	51,30	OK
B8	1,25	2,06	100,95	OK
B9	0,50	1,71	52,95	OK
B10	0,75	1,71	76,95	OK
B11	0,50	1,71	58,50	OK

Fonte: Produção própria do autor.

3.2.4.3. Verificação dos Tirantes

Finalmente realizou-se a verificação dos tirantes da estrutura. Para isso, analogamente à estrutura reforçada com aço CA-50, utilizou-se o critério de falha de von Mises. A fibra de carbono possui um comportamento ainda pouco conhecido quanto à sua ductilidade. Desse modo, visando a realização de um estudo comparativo preciso, definiu-se pela utilização do critério de falha de von Mises, uma vez que este apresenta-se como o mais adequado para materiais dúcteis, que é o caso do aço-carbono. Entretanto, diferentemente do aço-carbono, a fibra de carbono não apresenta comportamento dúctil, rompendo subitamente sem apresentar patamar

de escoamento quando chega ao seu limite de resistência. Considerando que, por segurança, as estruturas de concreto armado são dimensionadas para que haja primeiro o rompimento do concreto por tração e depois o escoamento do aço, de modo que a deformação final da viga seja significativa, permitindo alertar para o iminente colapso da estrutura, foi preciso contemplar uma maneira de garantir a segurança no uso da estrutura. Essa segurança é obtida considerando-se que, embora tenha comportamento frágil, a comparação entre as propriedades da fibra de carbono (item 3.2.3) e do aço carbono (item 3.2.1) permite observar que a relação entre resistências à tração é de 7:1, mas é de apenas 1,5:1 entre os módulos de elasticidade. Isso significa que a deformação das fibras de carbono é 4,67 vezes (7/1,5) a deformação do aço-carbono no rompimento da fibra, quando se encontram no regime elástico. Portanto, haverá deformação suficiente para que as medidas necessárias de segurança sejam tomadas caso a estrutura tenda a entrar em colapso.

Através da topologia da viga, estimou-se a área das seções transversais dos tirantes, para que se pudesse determinar a força de tração neles solicitada. Finalmente, pôde-se determinar a área de fibra de carbono necessária em cada um dos tirantes. Considerou-se ainda, visando a segurança da estrutura, a majoração em 40% na quantidade de fibras a serem utilizadas.

Tabela 7 - Dimensionamento dos tirantes da viga com fibra

Tirantes (Tração)								
Elemento	Tensão Solicitante [KN/cm ²]	A, seção [cm ²]	Força [KN]	f _{yd} [KN/cm ²]	A _{f,nec} [cm ²]	Área da Seção Fio T 12000 [cm ²]	Nº de Fibras	Nº de Fibras com Majoração
T1	1,00	40,50	40,50	325,00	0,12	0,00530	24	33
T2	0,85	51,00	43,35	325,00	0,13	0,00530	25	35
T3	1,20	68,55	82,26	325,00	0,25	0,00530	48	67
T4	0,80	45,00	36,00	325,00	0,11	0,00530	21	29
T5	2,00	84,75	169,50	325,00	0,52	0,00530	98	138
T6	0,80	45,00	36,00	325,00	0,11	0,00530	21	29
T7	1,20	68,55	82,26	325,00	0,25	0,00530	48	67
T8	0,85	51,00	43,35	325,00	0,13	0,00530	25	35
T9	1,00	46,50	46,50	325,00	0,14	0,00530	27	38

Fonte: Produção própria do autor.

4. Processo de Produção da Viga com Otimização Topológica

Neste capítulo será descrito o processo de desenvolvimento de tecnologia inovadora de produção de elementos pré-fabricados de concreto submetidos a otimização topológica, bem como será detalhado o processo construtivo elaborado para a solução inovadora e finalmente será apresentado o procedimento utilizado para a estrutura convencional.

4.1. Desenvolvimento de solução inovadora

A partir da metodologia descrita no capítulo 2, foi desenvolvida tecnologia de produção de elementos pré-fabricados de concreto submetidos a otimização topológica. Considerando os requisitos, funções e propriedades que se desejava que a viga apresentasse, listou-se as possíveis soluções consideradas para o problema abordado.

4.1.1. Lista de Possíveis Soluções

Deve-se ter em mente que, no processo de desenvolvimento de soluções, ensaios não são feitos para dar certo, mas sim para testar as soluções adotadas e fornecer dados para melhorá-las. Evidentemente em cada etapa de desenvolvimento, busca-se a melhor solução possível para ser testada. Desse modo, elencou-se as possibilidades e em seguida listou-se os aspectos positivos e negativos de cada componente das soluções propostas, para que fosse possível avaliar e definir a melhor entre as opções.

4.1.1.1. Processos de Manufatura das Fôrmas Internas

Pode-se categorizar os processos de manufatura em três diferentes tipos. São eles: fabricação aditiva, subtrativa e de moldagem.

- **Manufatura Aditiva:**

A implementação de processos de fabricação aditiva tem apresentado um considerável crescimento recentemente. Observa-se, atualmente, grandes avanços

na indústria proporcionados por esta manufatura. Entretanto, sua aplicação no mercado da construção civil ainda é incipiente.

Este tipo de processo apresenta algumas peculiaridades em comparação aos demais.

“A impressão 3D é um processo de manufatura aditiva que cria objetos físicos sólidos a partir de uma modelagem digital pela adição seletiva de camada por camada de material” (SEGIL, 2019, p.201, tradução nossa)⁶. Segundo Fujii (2013), o material só é adicionado em cada camada nos locais onde especificado pela definição CAD (*computer aided design*) auxiliado por computador. Essa diferença fundamental pode oferecer uma série de vantagens comerciais e técnicas sobre o processo tradicional.

Dentre essas vantagens, estão: a possibilidade de criação de produtos com a quantidade exata de matéria prima, sem que haja desperdícios; uma maior velocidade de desenvolvimento de protótipos, pois não necessita de matrizes e moldes; maior complexidade na geometria do produto, com configurações que não são possíveis nos processos normais de moldagem e estampagem; a utilização, no mesmo componente, de diversos materiais com características diferentes, já que cada material pode ser adicionado em camadas microscópicas.

Por outro lado, segundo Sigma Protótipos (2019), a manufatura aditiva pode ter como desvantagens o alto custo do equipamento, principalmente quando se busca grande precisão, alta produção, peças de maior tamanho, ou o uso de vários materiais na mesma peça. Atualmente, essa tecnologia é utilizada apenas para prototipagem e produção em pequena escala. Entretanto, a tendência é ampliar seu uso à medida que o custo dos equipamentos e materiais cai e a tecnologia fica mais madura. É necessária a realização de manutenção e calibração no equipamento de forma frequente. Manutenções preventivas previnem os problemas antes mesmo de eles acontecerem e devem ser programadas para que não se comprometa o processo produtivo. Como premissa do projeto, existe a necessidade de encontrar material de baixo custo e que seja reciclável ou biodegradável.

⁶ No original (3D printing is an additive manufacturing process that creates a solid physical object from a digital design adding material layer by layer.)

Após a realização de pesquisa com a finalidade de conhecer os principais materiais empregados na impressão 3D, considerou-se principalmente dois, os plásticos PLA e ABS.

De acordo com o estudo apresentado por Soares (2012), o PLA é um material que apresenta boas propriedades mecânicas e o interesse na sua utilização passa a ter uma certa relevância, uma vez que possui características biodegradáveis, além de não apresentar toxicidade ao ambiente.

“O ABS combina duas propriedades importantes, a boa resistência à tração e ao impacto, além de ser um material leve” (OSEJOS, 2016, p.17, tradução nossa)⁷. Desse modo, apresenta ampla utilização em protótipos. Em contrapartida, segundo Osejos (2016), este material apresenta uma degradação quando exposto excessivamente à luz, o que reduz a sua resistência à flexão.

Ambos os materiais utilizam na sua produção a tecnologia FDM (*fused deposition modeling*), onde um filamento sólido é fundido e depositado camada sobre camada em uma mesa de impressão.

O PLA apresenta uma maior facilidade na utilização em comparação ao ABS e pode ser usado em basicamente qualquer impressora, inclusive as de formato aberto. O polímero PLA apresenta uma menor resistência mecânica do que o ABS, tendo um comportamento de material frágil. Com relação às propriedades térmicas dos materiais, o ABS apresenta um desempenho superior ao do PLA, sendo capaz de resistir a temperaturas entre 90 e 100 °C. O PLA apresenta uma maior estabilidade dimensional do que o ABS, pois quando a temperatura varia, principalmente esfria, o ABS tende a retrair de modo mais acentuado. Entretanto, esse efeito pode ser compensado no fatiador, que é o software responsável pela conversão do modelo digital para a impressora, com a majoração do tamanho da peça, em 0,5% aproximadamente (SALZANO, 2019).

Analisando as propriedades associadas aos respectivos materiais, observou-se que o ABS é o mais desejável. Isso ocorre, porque a solução desejada será submetida a esforços externos e não pode ter um comportamento frágil, assim como

⁷ No original (El ABS se destaca por combinar dos propiedades muy importantes como: la resistencia a la tracción y la resistencia al impacto em un mismo material, además de es um material liviano)

altas temperaturas, no caso de elementos de maiores dimensões, devidas ao calor de hidratação do concreto.

- **Manufatura Subtrativa:**

Apresentando um conceito antagônico ao da manufatura aditiva, temos os processos de fabricação subtrativos.

“Manufatura subtrativa é um processo no qual objetos tridimensionais adquirem sua constituição formal através do corte de material de um bloco sólido do mesmo. Esse tipo de manufatura pode ser feita de maneira manual, mas é tipicamente feita através de uma máquina CNC” (Creative Mechanisms Blog, 2016, [n.p.], tradução nossa).⁸

Esse tipo de processo é altamente produtivo, quando se trabalha com produção em larga escala, pois o equipamento pode se manter em funcionamento constante por um longo período. Esses processos podem apresentar um maior ou menor grau de automação. Equipamentos CNC, por exemplo, são capazes de proporcionar resultados com uma alta precisão, uma vez que se trata de um processo numérico controlado por computador. No entanto, existem algumas desvantagens, a ocorrência de perda de material no processo, uma vez que se executa cortes em um volume do material (Engineering My World, 2020). Estas perdas poderiam ser eliminadas se fosse utilizado um material reciclável como, por exemplo, o alumínio. Todavia isso encareceria demasiadamente o processo.

- **Processos de Moldagem**

O terceiro tipo de processo de manufatura é o de moldagem. Uma das maneiras de realizar esse processo é através do método de injeção, onde as resinas são aquecidas, de modo a reduzir a viscosidade do material, e em seguida são forçadas para o interior dos moldes, para que assumam o formato desejado (D'ÁVILA, 1997).

Segundo o blog Indústria de Plásticos (2020), o processo de moldagem também pode ser feito por sopro, no qual a pressão do ar é usada para expandir o termoplástico fundido na forma desejada. Outro método existente para esse tipo de processo é a moldagem por extrusão (um caso especial de moldagem), no qual, segundo Araújo (2009, p.24) “os polímeros são normalmente submetidos a um severo

⁸ No original (Subtractive manufacturing is a process by which 3D objects are constructed by successively cutting material away from a solid block of material. Subtractive manufacturing can be done by manually cutting the material but is most typically done with a CNC Machine.)

tratamento térmico, à alta pressão e sob forte cisalhamento, sendo o teor de umidade adequadamente controlado pelo sistema de degasagem à vácuo”. Ao longo do processo a matéria prima tem a sua passagem forçada por uma matriz, por onde o material passa e assume a forma desejada.

Existe ainda o processo de moldagem rotacional:

Nesse processo, o pó de plástico é colocado no molde e aquecido em um forno. Uma vez quente, o molde é girado continuamente para facilitar o revestimento completo do interior do molde. Uma vez feito, o molde é removido e resfriado em um ambiente controlado (Indústria de Plásticos, 2020, [n.p.]⁹).

4.1.1.2. Elementos Resistentes à Tração

O concreto é um material que apresenta um ótimo desempenho quando solicitado aos esforços de compressão. No entanto nas regiões onde está submetido aos esforços de tração, deve receber o reforço de um material que apresente uma resistência adequada. O conceito de concreto armado convencional trabalha com a solidarização entre aço e concreto. Apesar disso, existem diversas outras possibilidades de elementos resistentes à tração, cujas propriedades estão apresentadas abaixo.

- **Aço em barras (vergalhões)**

Com a utilização de equipamentos de corte e dobra, têm-se um processo automatizado, o que confere mais precisão ao produto, é possível fazer a dobra de vergalhões de até 40 mm de diâmetro, podendo, esta, ser realizada em qualquer ângulo, seja ele positivo ou negativo (SCHNELLSPA, 2019).

⁹ Disponível em: <https://www.industriadeplasticos.com.br/as-4-principais-formas-fabricacao-de-produtos-de-plastico-e-suas-vantagens/>

Figura 27 – Equipamento de corte e dobra



Fonte: Captura de tela feita de vídeo do canal SchnellSpa no youtube, no link: https://www.youtube.com/watch?v=8_8SLaVJMKo

Segundo SchnellSpa (2019), o processo pode ser aplicado tanto em barras longas quanto em barras curtas. Têm-se, ainda, a possibilidade da execução de pequenos e grandes raios de curvatura da dobra.

Segundo Dionatan Caldart, agente comercial do grupo Schnell, em contato por correio eletrônico, para o volume previsto de elementos pré-fabricados, seriam necessárias, para compor o parque fabril, 3 máquinas (Linha 12mm – PRIMA, Máquina dobradeira P3, C4) mais um software para planilhamento e organização da produção. Paralelamente seria necessária uma estrutura de galpão de dimensões 20 por 60 metros, com ponte rolante ou pórtico. Além disso, ter-se-ia a necessidade de treinar equipe composta por pelo menos 5 funcionários, sendo 4 presentes no chão de fábrica e 1 responsável pelo planilhamento.

Verificou-se, então, que o sistema possui um custo muito elevado de implantação, girando em torno de R\$ 550.000,00 para as máquinas e R\$ 1.000,00 mensais para o software. Pelos motivos apontados acima, torna-se inviável, em um primeiro momento, esta possibilidade.

- **Fibras contínuas de Vidro**

A fibra de vidro é um material com aplicação incipiente na indústria da construção civil. Atualmente é possível observar a sua utilização na construção de painéis de concreto (GFRC), entre outras aplicações. Sobre as fibras podemos afirmar:

É um material composto pela aglomeração de finíssimos filamentos de vidro não rígidos e flexíveis. Essas pequenas fibras são unidas pela aplicação de resina de poliéster (ou outro tipo de resina), feitos com material plástico, derivado do petróleo. Em seguida, é colocado no material substâncias que catalisam o processo de polimerização (Sercel, 2015, [n.p.])¹⁰.

As fibras contínuas de vidro têm como principais vantagens o fato de não necessitarem de corte e dobra. Não existe, também, a necessidade de receberem cobertura para evitar corrosão. Podem ser colocadas de forma manual ou automatizada e por tratar-se de um material flexível, apresenta uma vantagem quando se deseja montar formas complexas. Trata-se de um material que não propaga chamas e não têm limite de incorporação em peso (Sercel, 2015).

Em contrapartida, para que não exista a necessidade de receber cobertura, deve-se trabalhar com uma fibra especial, que seja resistente à corrosão causada pelas substâncias alcalinas presentes no concreto. Outra desvantagem em relação à fibra de carbono é a sua menor resistência à tração que está numa faixa entre 1000 e 1700 MPa. Este elemento de reforço apresenta um custo intermediário por kg, maior que o do aço e menor que o do carbono.

Figura 28 – Carretel de fibra de vidro



Fonte: (BOURGUIGNON, 2010).

¹⁰ Disponível em: <http://www.sercel.com.br/blog/fibra-de-vidro-blog/fibra-de-vidro-o-que-e-e-para-que-serve.html>

- **Fibras contínuas de Carbono**

Os materiais de reforços compostos de carbono podem ser comumente encontrados na forma de fibras, material particulado ou “*whiskers*” (filamentos). Em casos como o da tecnologia desenvolvida, que se trata de um compósito estrutural, recomenda-se o uso do material na forma de fibras (MAZUMDAR, 2002). Estas podem apresentar características diferentes quanto à sua forma, podendo ser contínuas (fios) ou descontínuas (fibras picadas).

Segundo Galli (2016), o uso de fibras contínuas sem matriz de resina em aplicações estruturais ocorre devido ao fato de apresentarem uma maior área superficial, o que proporciona uma maior adesão com a matriz e uma maior eficiência na transferência de solicitações mecânicas entre matriz de concreto e reforço. Paralelamente, de acordo com Mazumdar (2002), o uso de diferentes configurações poderá resultar em um material compósito que apresentará propriedades distintas, uma vez que elas dependem da maneira como as fibras são posicionadas nos compósitos.

Tabela 8 – Classificação das fibras de carbono

Tipo	Propriedades e Características
I - Alto Módulo	Obtidas a partir do PAN e do piche mesofase, apresentam resistência mecânica à tração, usada principalmente na indústria de automóveis, e na pesquisa eletroanalítica.
II - Médio Módulo	Obtidas principalmente a partir do PAN, resistência à tração, baixa massa específica, utilizada comumente na indústria aeroespacial, carros de corrida e na construção civil.
III - Baixo Módulo	Obtenção a partir do rayon e piche isotrópico, apresentam resistência mecânica mais baixa, densidade um pouco mais elevada, é utilizada como enchimento de plásticos e como aditivo de concreto, custo baixo.

A fibra de carbono é um material que apresenta inúmeras vantagens. Trata-se de um material que apresenta uma baixa densidade e, ao mesmo tempo, uma elevada resistência às solicitações de tração, em torno de 7 vezes maior que a do aço, em média de 3530 MPa. Desse modo, ela apresenta uma alta relação entre resistência e peso. Entre outras propriedades, uma que se destaca é a resistência à corrosão, dispensando, portanto, a necessidade de receber revestimento. Ainda apresenta uma baixa dilatação quando exposta às variações de temperatura, assim como uma alta durabilidade, visto que apresenta uma fadiga menor ao longo do tempo, em comparação ao aço (TASUNS, 2016)¹¹.

Apesar de todas as vantagens indicadas, a fibra de carbono ainda apresenta uma aplicação limitada. Isso se deve principalmente ao alto custo do material. Estima-se que o preço por quilo de matéria-prima de fibra de carbono pode variar de 5 a 25 vezes o preço da fibra de vidro. E, dependendo do tipo de aplicação, ainda pode-se apontar, como desvantagem, a condutividade do material (Meet you carbide, 2019)¹².

As fibras de carbono apresentam uma característica muito importante, que é o seu comportamento anisotrópico, no qual as propriedades dependem da direção considerada. Desse modo, as propriedades do material são determinadas em função do material componente da matriz (natureza das fases), das áreas e formas da seção transversal, da quantidade, distribuição e orientação das fibras (FLINN; TROJAN, 1975).

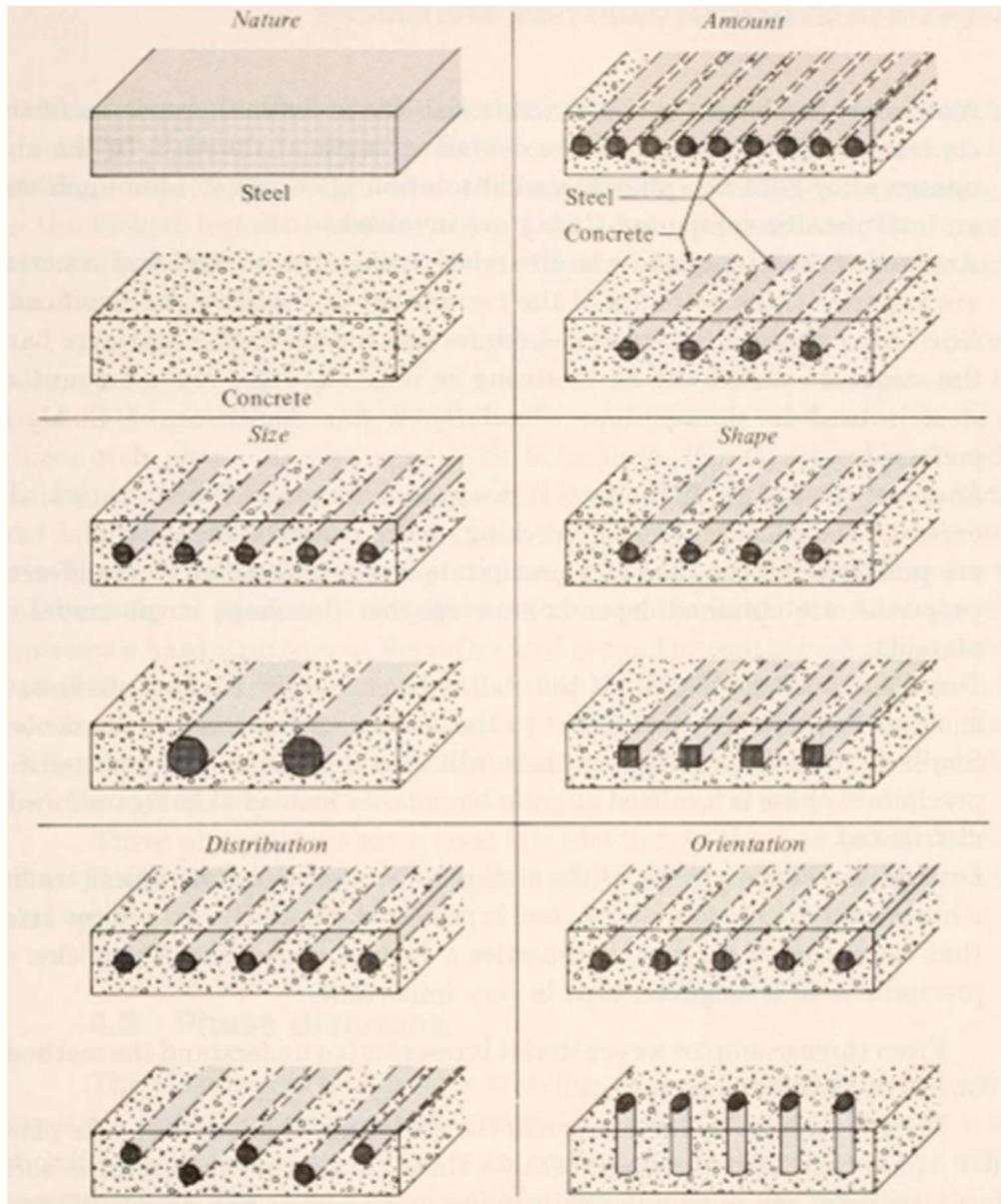
Sobre as características e propriedades das fibras de carbono, Galli (2016, p.3) afirma que:

Uma característica importante das fibras de carbono é o fato de serem extremamente anisotrópicas, uma vez que a organização do carbono em sua microestrutura assume a configuração do grafite, ou seja, com ligações químicas mais fortes dentro de um mesmo plano e mais fracas entre planos diferentes.

¹¹ Disponível em: <http://pt.custom-composite.com/news/advantages-disadvantages-of-carbon-fiber-1759145.html>

¹² Disponível em: <https://www.meetyoucarbide.com/pt/advantages-and-disadvantages-of-carbon-fiber-composites-cfrp/>

Figura 29 – Posicionamento e geometria das fibras



Fonte: (FLINN; TROJAN, 1975)

4.1.1.3. Elementos Resistentes à Compressão

Em se tratando de resistência às solicitações de compressão, o concreto é um material que apresenta um ótimo desempenho. Em sua composição estão contidos a água e o cimento, que combinados formam a pasta. Ao receber a adição dos agregados miúdo e graúdo, esta mistura heterogênea passa a ser denominada concreto. Encontra-se, no mercado da construção civil, uma grande variedade de concretos, os quais podem ser utilizados para diferentes tipos de aplicação. Desse

modo, identificou-se as vantagens e desvantagens de algumas das possibilidades, para que fosse possível determinar a melhor solução para o problema proposto.

- **Graute Autoadensável**

O Graute é um material usualmente utilizado em alvenaria estrutural, assim como no encamisamento de estruturas metálicas, promovendo uma camada de proteção contra a corrosão. Trata-se de um material que apresenta uma elevada fluidez, portanto possibilita o preenchimento de locais com difícil acesso sem que haja a necessidade do uso do vibrador (PEREIRA, 2018).

Segundo a fabricante Sika, na ficha técnica do produto SikaGrout – 295 BR em anexo, a mistura é isenta de cloretos e partículas metálicas. Desse modo, não promove a oxidação do aço quando em contato com a umidade. Além disso, apresenta resistências mecânicas elevadas, com rápido desenvolvimento das mesmas.

Este material apresenta uma série de vantagens, entretanto apresenta algumas limitações. “O Graute possui restrições de possibilidades de mudanças não planejadas, apresenta também dificuldades de improvisações, assim como uma limitação no vencimento de grandes vãos e balanços” (Plastbrinq, 2019, [n.p.])¹³. Além disso, apesar de proporcionar economias no custo da obra quando se necessita de pequenos volumes, na comparação direta com o concreto convencional, apresenta um custo mais elevado.

- **Concreto de Pós Reativos**

O concreto de pós reativos (CPR), como indica o próprio nome, é composto de partículas com diâmetro máximo dos agregados inferiores a 2mm. Trata-se de uma mistura que oferece grandes resistências à compressão, assim como à tração, no caso de adição de fibras metálicas na sua composição, dispensando a necessidade de utilização de armadura passiva (VANDERLEI; GIONGO, 2006).

Segundo Bina (1999), o CPR foi desenvolvido, por meio de pesquisas realizadas na França e no Canadá, com o objetivo de substituir o concreto de alto desempenho (CAD) e, até mesmo o aço. Seu processo de fabricação é realizado em condições similares a do concreto convencional, entretanto não há a adição de

¹³ Disponível em: <https://plastbrinq.com.br/graute/>

agregado graúdo. Trabalha-se, também, com uma baixa relação água/cimento, em torno de 0,15. Isto proporciona uma maior resistência e durabilidade às estruturas, uma vez que todo o cimento é hidratado, inclusive a parcela excedente é utilizada como um agregado. Além disso, é reduzida a porosidade do material e, desse modo, é bloqueada a penetração de agentes agressivos (BINA, 1999).

Figura 30 – Obra utilizando concreto de pós reativos



Fonte: Retirado do blog BMRC no link: <http://bmrc.com.br/blog/algumas-obras-com-concreto-de-pos-reativos/>

A elevada resistência alcançada pelo material permite que haja a diminuição das seções das estruturas, possibilitando a construção de estruturas mais esbeltas. No entanto, possui um custo elevado do m³ quando comparado ao concreto convencional. Além disso, apresenta fissuras quando solicitado à tração, fato que, conforme fora apontado anteriormente, poderia ser contornado com a adição de fibras, todavia aumentaria ainda mais o seu custo.

- **Concreto convencional autoadensável**

Trata-se de um concreto de alta trabalhabilidade, moldado sem a necessidade compactação ou vibração externa. No estado fresco deve apresentar fluidez, habilidade de passar por obstáculos que obstruam seu caminho, tal qual armaduras, assim como resistência à segregação. A principal motivação para o seu

desenvolvimento foram as recorrentes falhas de concretagens, as quais são frequentes na construção civil e, por vezes, podem vir a comprometer as propriedades e conseqüentemente a durabilidade das estruturas. Devido à ausência de adensamento, tem-se uma economia com mão de obra e equipamento, assim como uma redução no tempo de concretagem, pois há um aumento da velocidade do processo. Paralelamente, observa-se, também, vantagens do ponto de vista da segurança do trabalho, uma vez que há uma menor movimentação de funcionários e equipamentos no ambiente de trabalho, reduzindo, assim, o risco da ocorrência de acidentes. O CAA proporciona, ainda, um melhor acabamento às estruturas em comparação ao concreto convencional. Outras vantagens apresentadas pelo material são, devido às suas propriedades, a possibilidade de se ter seções mais delgadas, assim como a grande liberdade de formas e dimensões (DAL MOLIN, 2019).

Figura 31 – Ensaio de espalhamento (*slump flow*)



Fonte: Retirado do site da empresa Leonardi Pré-Fabricados no link: <http://www.leonardi.com.br/noticia/14/2016-01-08/concreto-auto-adensavel-versatilidade-comprovada-e-durabilidade-garantida>

Deve-se ter cuidado na dosagem e produção desse tipo de concreto, uma vez que este segrega com mais facilidade que o concreto convencional, devido à ação de aditivos superplastificantes. Desse modo, esse tipo de material requer um maior conhecimento técnico para que se tenha um controle de qualidade mais preciso. O

CAA possui um custo mais alto do que o concreto convencional, principalmente devido a necessidade de tais aditivos (Tecnosil, 2017)¹⁴.

4.1.1.4. Soluções Preliminares

Conforme foi apontado anteriormente, no processo de desenvolvimento de soluções, ensaios não são feitos para dar certo, mas sim para testar as soluções adotadas e fornecer dados para melhorá-las. Foi feita a avaliação das vantagens e desvantagens levantadas, de modo a definir a melhor entre as opções apresentadas. Visando elaborar uma solução ótima, pode-se combinar os diferentes tipos de processos que foram apresentados anteriormente.

- **Primeira Solução:**

A primeira possibilidade de solução idealizada consiste na construção de um sistema de fôrmas, com um mecanismo acoplado na face da seção longitudinal, o qual permitiria o posicionamento das barras de aço na posição correta. Este sistema foi pensado a partir de um mecanismo semelhante, utilizado para elementos protendidos. Isto vai ao encontro de um dos cinco paradoxos da inovação, que diz que para se criar é preciso copiar (AZAMBUJA, 2018)¹⁵.

No mecanismo proposto como solução inicial, o sistema de fôrmas contaria com um painel de fechamento inferior que representaria uma das faces laterais da viga. Enquanto isso, os painéis de fechamento laterais representariam o topo e a base da estrutura, diferentemente dos sistemas adotados para estruturas convencionais de concreto armado. Esta ideia preliminar foi inspirada em um sistema de fôrmas elaborado para elementos protendidos, ilustrado na figura 32.

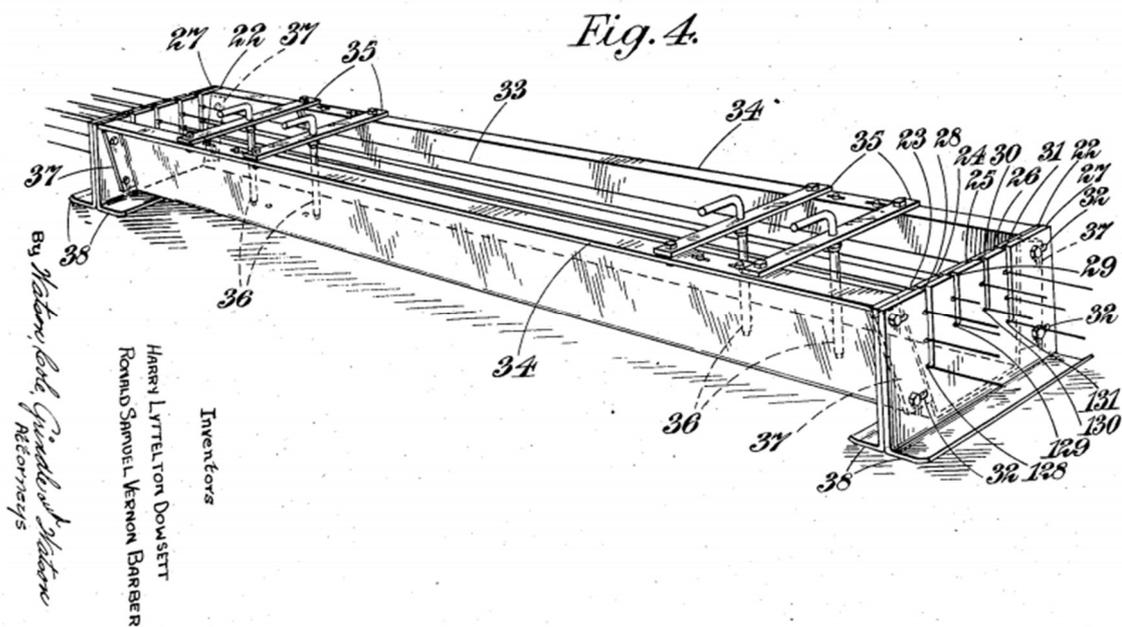
No sistema idealizado, seria prevista a colocação de trilhos nos elementos 34 e 35 indicados na figura. A colocação dos trilhos permitiria o deslocamento de cada um dos elementos de número 35 na direção paralela ao comprimento da viga. Do mesmo modo, os parafusos que ocupariam o lugar do elemento 36 (indicado na

¹⁴ Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/concreto-auto-adensavel-principais-caracteristicas-e-aplicacoes-2/>

¹⁵ A partir de notas de aula da disciplina Inovação da Construção, curso de Engenharia Civil, UFRGS, do Prof. José Azambuja.

ilustração) poderiam ser deslocados na direção da seção transversal da viga. Isso permitiria que os parafusos pudessem ser posicionados de maneira precisa nas regiões nodais, sendo fixados em dois pontos (no elemento 35 e no painel de fechamento inferior), com o objetivo de guiar o posicionamento e conferir o espaçamento adequado às barras de aço, amarrando-as com o auxílio de fio de aço revenido (arame) nos níveis desejados, respeitando as áreas de aço previstas em projeto para as regiões dos tirantes.

Figura 32 – Ilustração do sistema para elementos protendidos



Fonte: (DOWNSETT; BARBER, 1946)

Portanto, os elementos de reforço às solicitações de tração seriam barras de aço CA-50 curvadas, acompanhando a direção das linhas de tensão de tração presentes na viga com otimização topológica.

Após o posicionamento das barras de aço seria realizada a colocação de fôrmas internas, preenchendo os espaços onde se deseja que permaneçam vazios (sem concreto). Por se tratar de elemento pré-fabricado, deverá ser produzido em larga escala, dessa forma seria viável a utilização de sistema de fôrmas metálicos.

Observou-se, a partir da solução preliminar, que a utilização de barras de aço em forma de arco não seria viável tecnicamente, pois não haveria praticidade no

posicionamento das mesmas, ainda mais artesanalmente. Dessa forma, não seria necessária a utilização do mecanismo proposto.

- **Segunda Solução:**

Após desconsiderar o mecanismo proposto na solução 1, avaliou-se a possibilidade de utilizar um sistema composto por fôrmas internas e fôrmas externas. As externas poderiam ser, tanto de material metálico, quanto de madeira. Já para as fôrmas internas ter-se-ia a fabricação de moldes através de processos aditivos (impressão 3D), ou então através de processos subtrativos (CNC – milling machine). Esses moldes confeririam a geometria com os espaços vazios apresentados pela viga. Ambos os processos apresentam uma elevada precisão, uma vez que são automatizados e a precisão é uma característica inerente aos equipamentos¹⁶, entretanto os processos aditivos apresentam um menor desperdício de materiais na sua construção.

Paralelamente as armaduras utilizadas poderiam ser dobradas nos ângulos desejados através da utilização de um equipamento de corte e dobra (*bending machine*) da empresa Schnell ou outra empresa que produza equipamentos automatizados para esse fim.

O concreto utilizado na solução deve apresentar a menor dimensão máxima possível do agregado (brita 0) e deve ter elevada fluidez (autoadensável) para que não apresente falhas de concretagem, nem a necessidade de vibração mecânica para o adensamento do concreto. Outra possibilidade seria, também, a utilização de concreto de pós-reativos. Esse, entretanto, é bem mais caro. CPR pode ser uma opção tecnológica no futuro, mas também necessitará receber reforço de fibras (carbono, vidro ou aço).

4.1.1.5. Solução Adotada

Para a fabricação das fôrmas internas de plástico ABS, optou-se pela manufatura aditiva, entretanto, devido à pandemia de COVID-19, não foi possível

¹⁶ A partir de notas de aula da disciplina Inovação da Construção, curso de Engenharia Civil, UFRGS, do Prof. José Azambuja.

acessar os equipamentos da UFRGS que realizam esse tipo de trabalho. Assim, foi adotada a manufatura subtrativa, descrita mais adiante. Apesar de ambos os processos apresentarem uma elevada precisão e produtividade, o processo aditivo leva algumas vantagens em relação ao subtrativo, como a maior velocidade de produção e simplicidade do processo, considerando que não é necessário produzir uma matriz, menor quantidade de material utilizado (produção com a quantidade exata de materiais), sem desperdícios.

A viga recebeu armadura passiva, sendo o elemento de reforço fibras contínuas de carbono, que conferem uma elevada resistência à tração. As fibras foram posicionadas através de dispositivos fixados nos nós da treliça, sendo eles responsáveis pela ancoragem das fibras, como será visto mais adiante.

Figura 33 – Fio de fibra de carbono



Fonte: Imagem fornecida pelo fornecedor do material (Texiglass).

O concreto adotado foi do tipo autoadensável, pois este apresenta a habilidade de fluir por através de obstáculos que poderiam obstruir a passagem do concreto convencional. Além disso, esse concreto tem a vantagem de eliminar a necessidade de adensamento por vibração mecânica. O agregado graúdo deve apresentar um adequado módulo de finura e dimensão máxima inferior a 9,5 mm. Em comparação às demais tecnologias, o graute foi desconsiderado, pois tem um custo bastante superior aos outros concretos, o que traz limitações em situações onde se necessita grandes volumes de concreto. O CPR também apresenta um alto custo quando comparado ao concreto convencional.

4.2. Processo Construtivo

Nesta seção serão apresentados e descritos os processos construtivos adotados para a execução de duas vigas, uma delas de concreto armado convencional e a outra de concreto reforçado com fibras contínuas de carbono.

A fabricação da viga de concreto armado convencional teve por objetivo atender à necessidade de criar uma referência conhecida para poder avaliar e comparar o desempenho da viga com otimização topológica.

O processo desenvolvido para a estrutura inovadora foi direcionado à pré-fabricação. Este tipo de construção proporciona uma série de vantagens e possibilidades às obras de engenharia civil.

4.2.1. Viga de Concreto Armado Convencional

Será exposto, abaixo, o processo construtivo para uma viga de concreto armado convencional. Este tipo de estrutura apresenta o concreto como elemento resistente à compressão e o aço CA-50 como elemento resistente à tração. Ambos os materiais devem agir solidariamente e, assim, resistir aos esforços, aos quais são submetidos.

4.2.1.1. Sistema de Fôrmas

Foram utilizadas para a confecção das fôrmas das vigas, chapas de compensado de 2,20 x 1,10 m, com espessura de 9 mm. Estas são feitas de lâminas de madeiras coladas umas às outras com resina e pressão. Idealmente, ter-se-ia a utilização de compensado naval, pois este apresenta uma maior resistência à umidade devido à fixação das lâminas ser feita com cola fenólica. Comparado aos demais, apresenta uma menor predisposição à deformação. Por questões econômicas, foi utilizado o compensado sarrafeado que apresenta um valor de em torno de 50% menor em comparação ao naval (LEO MADEIRAS, [s.d.])¹⁷.

¹⁷ Disponível em: <https://www.leomadeiras.com.br/madeiras/compensados/040101>

Figura 34 – Chapa de compensado sarrafeado e painéis



Fonte: Produção própria do autor.

A partir das dimensões especificadas em projeto para a viga, foi realizado o corte das chapas. Desse modo, utilizou-se uma serra circular, equipamento adequado para executar cortes retos em madeiras, para partir os painéis que quando unidos constituiriam a fôrma. Em seguida, foram identificados os painéis visando a etapa de montagem.

Figura 35 – Equipamento utilizado no corte dos painéis



Fonte: Produção própria do autor.

Figura 36 – Identificação dos painéis da viga de CA



Fonte: Produção própria do autor.

Finalmente, procedeu-se à montagem das fôrmas. Para isso foram utilizados pregos de aço com cabeça 12 mm e martelo. Primeiramente foi posicionado o painel inferior. Em seguida fixou-se os painéis responsáveis pelos fechamentos laterais. Para auxiliar na absorção dos esforços laterais, utilizou-se sarrafos de madeira, comumente chamados de gravatas, fixados tanto na parte inferior quanto na lateral, conferindo enrijecimento estrutural à fôrma.

Figura 37 – Montagem da fôrma da viga de CA finalizada



Fonte: Produção própria do autor.

4.2.1.2. Montagem e Posicionamento de Armaduras

A partir do dimensionamento realizado para a estrutura, pôde-se determinar a armadura longitudinal necessária, assim como a armadura de corte. Como apontado no dimensionamento, foram necessárias 4 barras de 10 mm de diâmetro com ganchos

de ancoragem com a adição de 2 barras retas de 10 mm para a amarração dos estribos. Adotou-se estribo simples, com 2 ramos e calculou-se um espaçamento de 10,2 cm entre eles.

O processo de montagem da armadura conta com algumas etapas. A montagem foi feita em uma superfície de trabalho adequada. Primeiramente realizou-se o corte e dobra das barras longitudinais e dos estribos nas dimensões determinadas pelo projeto. Em seguida, posicionou-se as barras longitudinais das extremidades, sobre a superfície de trabalho para que se pudesse marcar nelas o espaçamento dos estribos. Após esta etapa, posicionou-se os estribos já cortados e dobrados ao longo das barras. Posteriormente posicionou-se e fixou-se as demais barras longitudinais, sendo todos os elementos amarrados entre si com fio de aço revenido (comumente chamado de arame queimado).

Figura 38 – Montagem da armadura finalizada



Fonte: Produção própria do autor.

4.2.1.3. Concretagem

Antes de proceder à concretagem da viga, foi prevista a colocação de espaçadores do tipo roseta a cada 45 cm, para garantir o cobrimento da armadura estipulado em projeto. Esta é uma etapa muito importante, uma vez que a falta de cobrimento pode refletir diretamente na durabilidade da estrutura. Paralelamente deve-se galgar a estrutura visando a manutenção da uniformidade da largura ao longo do comprimento da viga.

Figura 39 – Conferência pré-concretagem



Fonte: Produção própria do autor.

Finalmente foi feita a concretagem. Foi definido, para a viga de concreto armado convencional, um concreto que deveria alcançar uma resistência característica de projeto aos 28 dias igual a 30 MPa. Utilizou-se cimento CII – F, que apresenta concentração de 6 até 10% de filler calcário. O traço do concreto adotado foi (1 : 3,26 : 3,75) com uma relação $a/c = 0,61$, o qual é diferente daquele adotado para a estrutura com otimização topológica. A ideia inicial era utilizar o mesmo traço de concreto para as duas vigas. Todavia, devido às condições de projeto, foi necessário alterar o traço de concreto da viga com otimização topológica para aumentar a sua resistência característica, uma vez que o objeto de comparação do estudo é a resistência ao carregamento. Considerou-se a utilização de agregado graúdo com dimensão máxima de 9,5 mm (brita 0) e areia grossa. Utilizou-se também aditivo superplastificante a uma concentração de 0,4% do peso do cimento para que se obtivesse uma solução autoadensável, dispensando, assim, a necessidade de vibrador para o adensamento do concreto.

Figura 40 – Mistura de concreto C30 realizada em betoneira



Fonte: Produção própria do autor.

4.2.2. Viga reforçada com fibra de carbono

Será detalhado, abaixo, o processo construtivo, inovador, proposto para uma viga de concreto reforçada com fibra de carbono. A estrutura apresenta o concreto como elemento resistente à compressão e a fibra contínua de carbono como elemento resistente à tração. Assim como nas estruturas de concreto armado convencionais, os materiais devem agir solidariamente e, desse modo resistir aos esforços, aos quais são submetidos.

4.2.2.1. Sistema de Fôrmas

Analogamente ao sistema construtivo em concreto armado convencional, utilizou-se chapas de compensado de 2,20 x 1,10 m, com espessura de 9 mm para confeccionar as fôrmas das vigas. Como apontado anteriormente, idealmente, ter-se-ia a utilização de compensado naval, todavia por questões econômicas, empregou-se o compensado sarrafeado que apresenta um valor mais acessível.

Do mesmo modo que para a viga de concreto armado, executou-se o corte das chapas a partir das dimensões especificadas em projeto para a viga. Desse modo, utilizou-se uma serra circular, equipamento adequado para executar cortes retos em madeiras, para partir os painéis que quando unidos constituiriam o sistema de fôrmas. Em seguida, foram identificados os painéis visando a etapa de montagem.

Figura 41 - Identificação dos painéis da viga com fibra



Fonte: Produção própria do autor.

Para que fosse possível posicionar o sistema de fôrmas internas com precisão, através das coordenadas determinadas no software AutoCAD para a estrutura, desenhou-se os pontos nos devidos lugares, os quais representariam os blocos que constituem o sistema de fôrmas internas e os nós por onde passam as fibras de carbono contínuas.

Figura 42 – Materiais utilizados para marcação dos pontos



Fonte: Produção própria do autor.

Figura 43 – Painel com fôrmas internas e nós indicados



Fonte: Produção própria do autor.

Concluindo o processo de montagem da parte externa do sistema, procedeu-se a montagem das fôrmas, onde primeiramente foi posicionado o painel inferior e em seguida fixou-se os painéis responsáveis pelos fechamentos laterais. Assim como na viga de concreto armado, para auxiliar na absorção dos esforços laterais, utilizou-se sarrafos de madeira, comumente chamados de gravatas, fixados tanto na parte inferior quanto na lateral, conferindo enrijecimento estrutural à fôrma.

Figura 44 - Montagem da fôrma da viga com fibra finalizada



Fonte: Produção própria do autor.

Uma vez que a viga deve apresentar vazios, referentes às regiões em que a estrutura não está sendo solicitada, foi previsto um sistema de fôrmas internas, que aliado às fôrmas externas proporcionariam a constituição formal esperada para a viga com otimização topológica.

Como apontado anteriormente, a solução ideal contaria com a utilização de blocos do polímero ABS, e através da tecnologia FDM (*fused deposition modeling*) seriam moldados a partir de impressão 3D. Devido à situação da pandemia de COVID-19, não foi possível o acesso aos laboratórios da universidade e, dessa forma, optou-se por uma solução alternativa, a confecção dos blocos em EPS (poliestireno expandido), popularmente conhecido como Isopor.

Trabalhou-se com uma placa de isopor de 1 m² com espessura de 15 cm, equivalente à largura da viga. Para realizar o corte do isopor, primeiramente marcou-se os pontos com caneta permanente. Em seguida utilizou-se faca e estilete, já que não se tinha acesso aos cortadores de fio quente da UFRGS, porém a espessura elevada da placa foi um empecilho, dificultando o corte. Aplicou-se uma camada externa de cola PVA para evitar que o EPS fragmentasse, mantendo, assim, a integridade da peça. Finalmente, utilizando filme de PVC, envolveu-se os blocos de EPS, para que, no momento da desfôrma da viga, não se tivesse a aderência do EPS ao concreto.

Foi feita a identificação dos blocos, considerando a etapa de montagem do sistema de fôrmas. Os blocos foram identificados de 1 a 11 e foram fixados ao painel inferior da fôrma após o posicionamento da fibra de carbono nos tirantes.

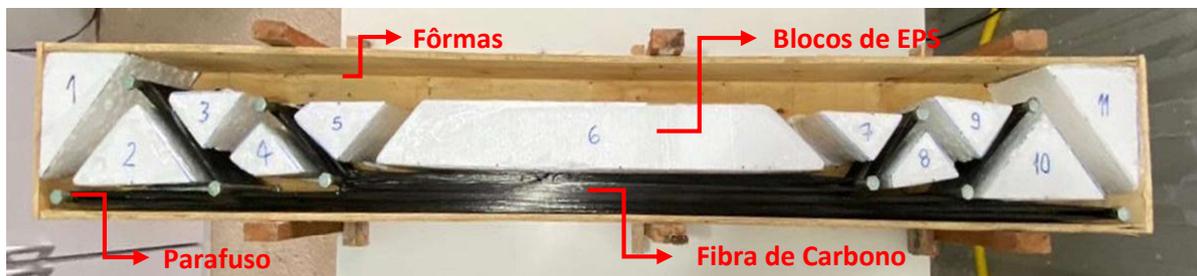
Figura 45 – Identificação do sistema de fôrmas internas



Fonte: Produção própria do autor.

Os blocos foram posicionados nas marcações feitas no painel de fechamento inferior da fôrma. A fixação dos blocos ao painel inferior foi feita por meio de adesivo PVA.

Figura 46 – Fixação do sistema de fôrmas internas



Fonte: Produção própria do autor.

4.2.2.2. Posicionamento da fibra de carbono

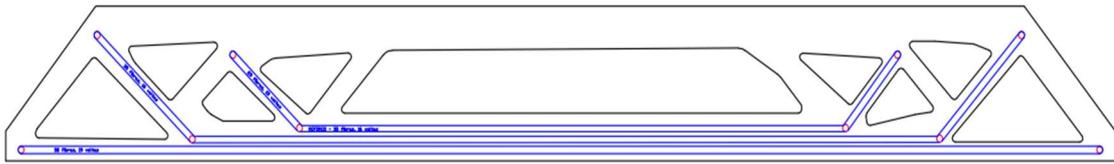
O elemento resistente à tração utilizado foi o fio de fibra de carbono. Uma vez que se trata de um material flexível, foi necessário elaborar um sistema capaz de guiar e fixar os fios nas direções dos tirantes, posicionando-os firmemente para receber a concretagem. Foram utilizados parafusos, cuja especificação está descrita mais abaixo. Desse modo, foi feita a disposição dos elementos em três linhas, as quais encontram-se em 3 diferentes níveis (ver figura 48).

Figura 47 – Carretel de fibra de carbono



Fonte: Produção própria do autor.

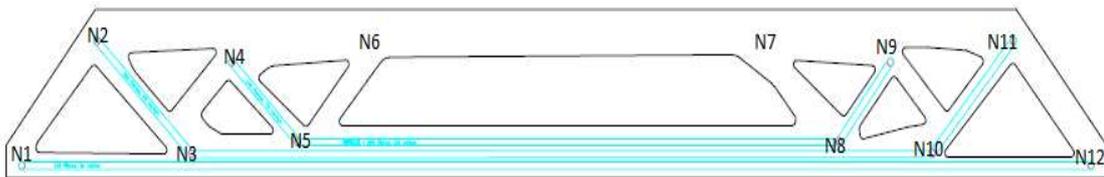
Figura 48 – Detalhamento do posicionamento dos fios



Fonte: Produção própria do autor.

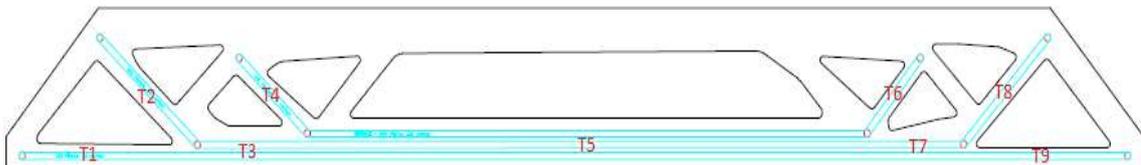
A linha 1 é responsável pela ligação entre os nós 1 e 12 (ver figura 49) e resiste isoladamente aos esforços de tração solicitados nos tirantes (ver figura 50) T1 e T9; e resiste solidariamente aos esforços dos tirantes T3, T5 e T7. A linha 2 está posicionada logo acima da 1. Ela responde isoladamente aos esforços dos tirantes T2 e T8; e responde solidariamente aos esforços dos tirantes T3, T5 e T7. Finalmente, a linha 3 posiciona-se acima das demais e resiste isoladamente às solicitações nos tirantes T4 e T6; e resiste solidariamente aos esforços do tirante T5.

Figura 49 – Identificação dos nós da estrutura



Fonte: Produção própria do autor.

Figura 50 – Identificação dos tirantes da estrutura

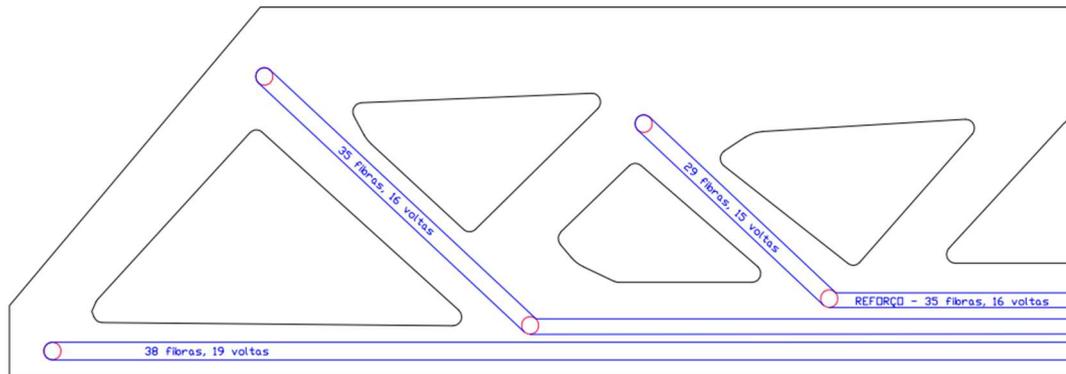


Fonte: Produção própria do autor.

Conforme foi apontado na etapa de dimensionamento, devido à diferença nas tensões a que os diversos tirantes estão submetidos, há uma correspondente variação na quantidade de fios de fibra de carbono em cada uma. No processo construtivo, optou-se pela segmentação em linhas, dimensionando-se cada linha para os seus tirantes finais (aqueles em que elas atuam isoladamente). Nas zonas intermediárias,

avaliou-se se a somatória de fios em cada linha atenderia a quantidade prevista em projeto, o que ocorreu nas regiões dos tirantes T3 e T7. Por outro lado, na região do tirante T5, a zona mais solicitada, esta condição não foi atendida. Desse modo, foi prevista a colocação de reforço neste tirante.

Figura 51 – Detalhamento da quantidade de fios



Fonte: Produção própria do autor.

Para fixar a fibra de carbono ao parafuso, foi dado um nó na fibra em um parafuso de extremidade (ver figura 52). A fibra amarrada foi passada ao lado dos demais nós e voltando ao nó original. Esse circuito foi repetido diversas vezes. Ao atingir o número de voltadas necessárias, apontado em projeto, interrompeu-se o processo.

Figura 52 – Início do posicionamento da fibra de carbono



Fonte: Produção própria do autor.

Trata-se de um processo repetitivo, que poderia muito bem ser executado por um equipamento mecanizado, ou mesmo robotizado. Durante o processo de concretagem observou-se que, apesar de ser feita uma leve tração nas fibras durante

o seu posicionamento, quando foram solicitadas com o peso próprio do concreto, estas deslocaram-se levemente da posição inicial. Sendo assim, poderia ser utilizado um equipamento composto por um braço mecânico, capaz de proporcionar tanto uma maior velocidade no posicionamento das fibras, uma vez que foi necessário em torno de 4 horas para completar o processo, quanto uma maior precisão inclusive conferindo uma maior tração às mesmas e uma melhor distribuição ao longo da largura da viga. Para isso, seria interessante desenvolver uma melhor ancoragem dos parafusos

Figura 53 – Finalização do posicionamento das fibras



Fonte: Produção própria do autor.

Como mencionado anteriormente (item 4.2.2.2), para possibilitar a fixação dos fios de carbono, utilizou-se um sistema composto por parafusos sextavados de $\frac{1}{2}$ " com 7" de comprimento, porcas e arruelas. A solução completa incluía a utilização de um segmento de tubo de PVC 25mm para água encapsulando o parafuso, visando o reaproveitamento do sistema. A única peça perdida seria o segmento de tubo de PVC, de baixo custo. Entretanto, como esse trabalho era experimental, considerou-se não utilizar o tubo de PVC e admitir a perda dos parafusos. Conforme apontado acima, foram marcados no painel de fechamento inferior o posicionamento dos nós. A partir deles, furou-se a chapa para que se pudesse fixar os parafusos.

Figura 54 – Jogo de parafuso utilizado



Fonte: Produção própria do autor.

Após a realização dos furos no painel, com o auxílio de duas porcas para cada parafuso, uma delas na face superior do painel e a outra na inferior, e uma arruela, que visa aumentar a superfície de contato e consequentemente melhorar a fixação do parafuso, fixa-se, então, o elemento responsável por posicionar os fios de carbono (ver figuras 55 e 56).

Figura 55 – Parafuso fixado na região do nó



Fonte: Produção própria do autor.

Figura 56 – Fixação dos parafusos na face inferior



Fonte: Produção própria do autor.

O sistema idealizado apresentou um bom desempenho, uma vez que o modo de fixação dos parafusos conferiu uma rigidez ao mesmo, portanto não houve deslocamento da posição desejada. Paralelamente, a porca posicionada na parte interna do painel da fôrma e a cabeça do parafuso funcionaram como limitadores para que a fibra não encostasse na fôrma inferior e não se deslocasse além dos limites de

largura da viga, considerando o cobrimento para envelopamento da mesma. Observou-se que os nós N1 e N12 deveriam ser posicionados mais afastados da fôrma lateral, afastando, assim, a fibra dos painéis de fechamento lateral, o que facilitaria o processo de concretagem.

4.2.2.3. Concretagem

A última etapa do processo construtivo foi a concretagem. Ela, foi realizada com um concreto que deveria alcançar uma resistência característica de projeto aos 28 dias igual a 50 MPa. Inicialmente ter-se-ia um concreto de menor resistência, porém os critérios estabelecidos pelo método das bielas e tirantes não foram atendidos, portanto aumentou-se a resistência do mesmo. Analogamente ao concreto utilizado para a viga de concreto armado, utilizou-se cimento CII – F, que apresenta concentração de 6 até 10% de filler calcário. O traço do concreto adotado foi (1 : 1,96 : 2,24) com uma relação a/c = 0,46. Conforme foi apontado anteriormente, o objeto de comparação do estudo foi a resistência aos carregamentos solicitados, portanto as vigas poderiam apresentar diferenças tanto na constituição (estrutura interna), quanto na forma (geometria). Considerou-se a utilização de agregado graúdo com dimensão máxima de 9,5 mm (brita 0), pois o material deve ter a habilidade de passar entre as fibras, e areia grossa.

Figura 57 – Agregados utilizados no concreto



Fonte: Produção própria do autor.

Utilizou-se também aditivo superplastificante Glenium 51 a uma concentração de 0,4% do peso do cimento para que se obtivesse uma solução autoadensável, dispensando, assim, a necessidade de vibrador para o adensamento do concreto.

Figura 58 – Adição de aditivo superplastificante



Fonte: Produção própria do autor.

Cabe ressaltar que, por se tratar de um material que não degrada devido à agentes externos, não seria necessário executar o cobrimento da fibra, entretanto, por tratar-se de um material quebradiço, buscou-se deixá-lo totalmente envelopado pelo concreto.

Durante o processo de concretagem encontrou-se dificuldades no lançamento do concreto nas regiões dos nós e dos tirantes. Isso ocorreu devido à proximidade da fibra com os painéis de fechamento lateral das fôrmas, já mencionada. Desse modo, utilizou-se uma haste metálica para auxiliar na concretagem. Com ela, deslocou-se a fibra de carbono de modo que se fosse possível dar acesso ao concreto a todas as regiões do elemento.

Figura 59 – Auxílio de haste metálica na concretagem



Fonte: Produção própria do autor.

Finalmente, após o lançamento do concreto, utilizando a ferramenta colher de pedreiro, conferiu-se um acabamento adequado à estrutura.

Figura 60 – Acabamento da viga



Fonte: Produção própria do autor.

4.2.2.4. Desfôrma

Optou-se por realizar o processo de cura da viga na própria fôrma. Nos primeiros sete dias pós concretagem realizou-se a cura molhada dos elementos, visando atingir a resistência esperada e evitar a ocorrência de retração e consequentemente a fissuração dos elementos. Desse modo, foi feita a desfôrma dos elementos 28 dias após a concretagem.

Figura 61 – Viga com otimização topológica desformada



Fonte: Produção própria do autor.

Nesta data, o concreto atinge a sua resistência característica de projeto. Observou-se que o concreto autoadensável foi capaz de penetrar entre os obstáculos e não houve nenhuma falha de concretagem ou segregação de material em nenhuma das duas vigas.

5. Resultados

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para os estudos de viabilidade técnica e econômica da tecnologia de produção desenvolvida para elementos pré-fabricados de concreto reforçados com fibra de carbono submetidos a otimização topológica.

5.1. Estudo de viabilidade técnica

O estudo realizado tratou-se de um comparativo entre duas estruturas. Inicialmente foi determinada uma geometria preliminar para ambos os elementos, porém, com o andamento do projeto ocorreram algumas alterações nas geometrias iniciais. No caso da viga de concreto armado convencional, esta teve o seu comprimento aumentado para conformar o gancho de ancoragem dimensionado. Por outro lado, a viga com fibra de carbono, após o processo de otimização, assumiu a sua geometria apresentada, com os vazios nas regiões não solicitadas. Cabe ressaltar que o objeto de comparação entre as vigas foi a resistência ao carregamento ao qual às estruturas estariam submetidas. Como mencionado anteriormente, as duas estruturas assumiram diferentes constituições formais, mas ambas foram dimensionadas para atender às mesmas cargas de projeto.

Com o objetivo de verificar o comportamento das estruturas, o atendimento aos requisitos de projeto e a viabilidade técnica do mesmo, realizou-se um ensaio em ambas as vigas com o intuito de testar as suas capacidades de carga.

5.1.1. Ensaio

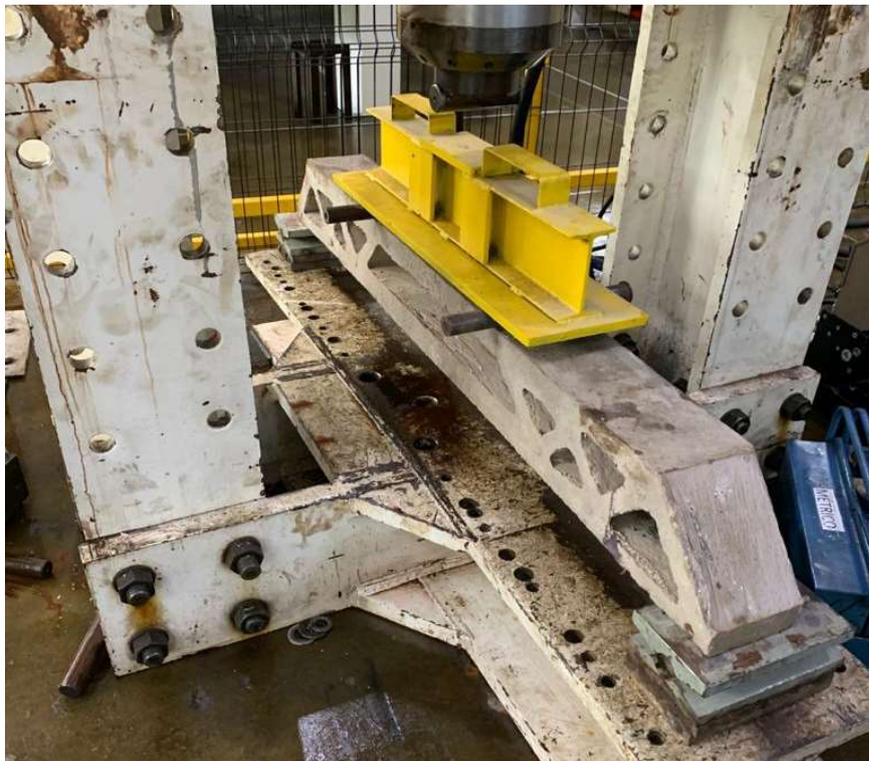
As vigas construídas foram submetidas a ensaios estáticos de flexão. Este tipo de ensaio é fundamental para que se possa conhecer o comportamento da estrutura quando submetida a tais esforços. O carregamento determinado para os elementos foi definido considerando a ocorrência de flexão pura na região situada entre as cargas aplicadas (ver item 3.1.1).

Ambas as estruturas foram submetidas ao processo de concretagem na mesma data, portanto apresentam tempo de cura do concreto semelhante e superior aos 28 dias, no qual a estrutura atingiria a sua resistência característica.

Para que fosse possível a realização dos ensaios, foram necessários uma série de equipamentos, os quais foram disponibilizados pelo LEME (Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais) e pelo LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física), onde foram realizados os ensaios. Ambos os laboratórios fazem parte do grupo de laboratórios da Escola de Engenharia da UFRGS. Foram utilizados durante os ensaios mecanismos que simulavam o comportamento dos apoios, sendo um deles simples e o outro duplo. Além disso, foi necessário um perfil metálico que, em conjunto com dois roletes metálicos, foram empregados na aplicação de duas cargas pontuais espaçadas a um terço e dois terços do comprimento da viga. Foi utilizada, para a aplicação do carregamento, uma prensa hidráulica capaz de fornecer até 50 tf (ver figura 62).

Antes de iniciar o ensaio, definiu-se uma taxa de aplicação de carga constante igual a 10 KN por minuto. No decorrer dos ensaios pôde-se monitorar o carregamento ao longo do tempo e estes foram finalizados somente após a ruptura das estruturas.

Figura 62 – Estrutura posicionada para o ensaio



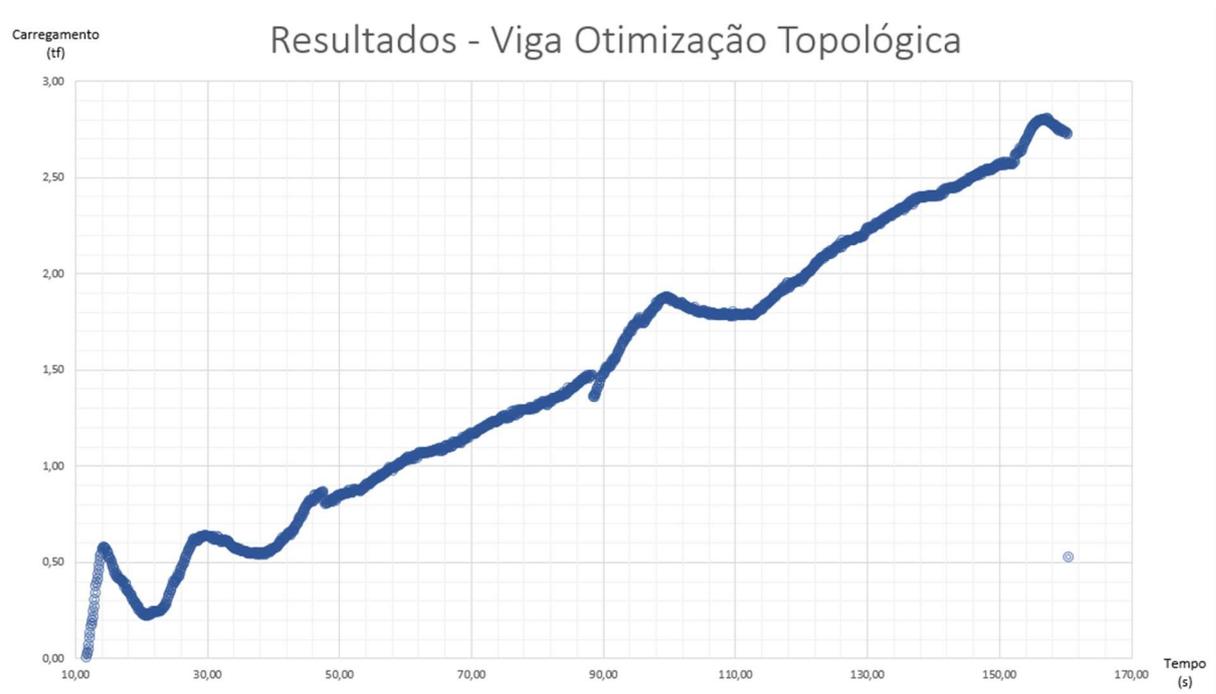
5.1.2. Análise dos resultados

As vigas apresentaram comportamentos distintos quanto à sua ruptura. No caso da viga submetida a otimização topológica e reforçada com fibra de carbono houve uma deformação mínima antes da ocorrência da falha. Já a viga de concreto armado convencional apresentou uma flecha considerável antes da ocorrência da sua ruptura. As deformações não foram medidas diretamente por falta de deflectômetros disponíveis.

Em um primeiro momento, as vigas foram submetidas somente aos seus estados limite últimos (ELU). Todavia, futuramente, as estruturas deverão ser submetidas às condições de serviço (ELS), para que seja possível avaliar o seu desempenho quanto ao conforto do usuário e durabilidade da estrutura.

Foram gerados gráficos que apresentam os valores de carga que foram aplicadas ao longo do tempo de ensaio para que se fizesse a análise do desempenho das estruturas, os quais são apresentados abaixo:

Figura 63 – Gráfico de carregamento da viga com otimização topológica



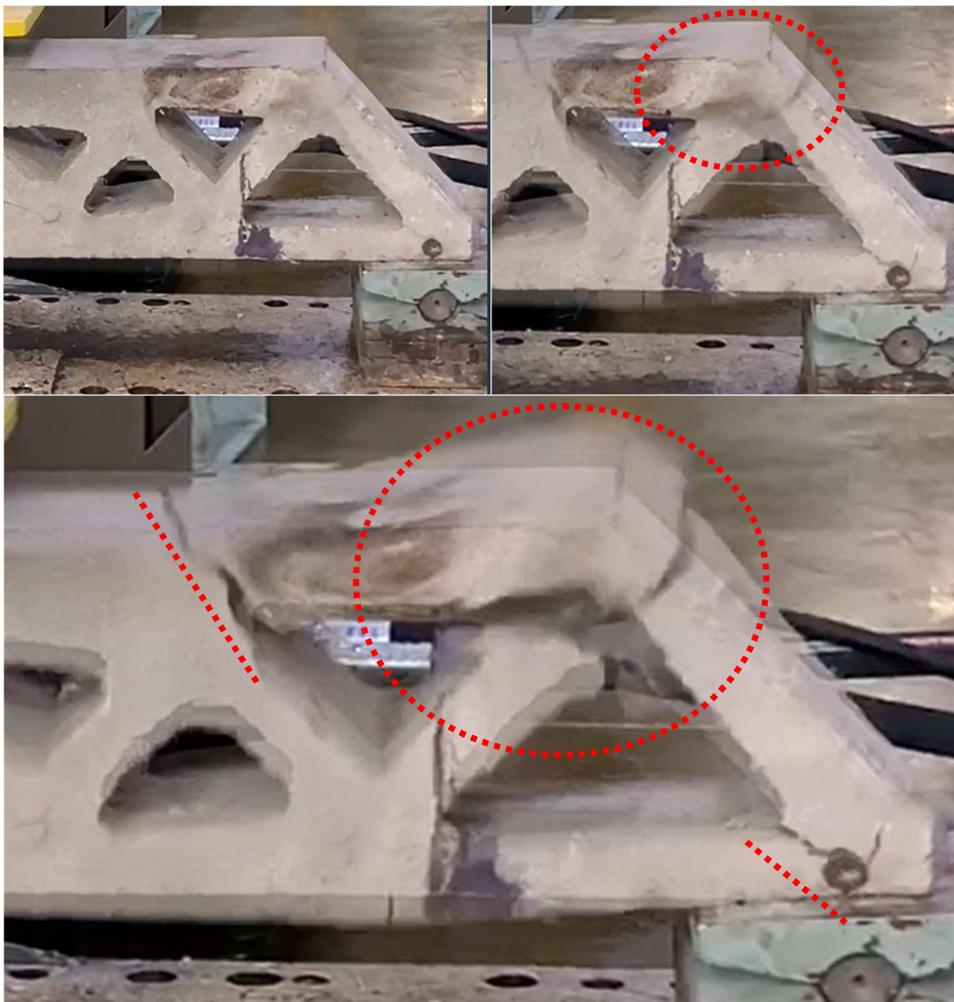
Fonte: Produção própria do autor.

Pode-se observar, através do gráfico, que a ruptura da viga reforçada com fibra de carbono, submetida a otimização topológica, ocorreu para $t = 160s$, após atingir

uma resistência ao carregamento de 2,75 tf. Inicialmente a viga havia sido dimensionada para resistir a um carregamento total de 4,8 tf. Sendo assim, uma vez que o carregamento de projeto não foi suportado, o resultado não foi satisfatório.

Visando conhecer o motivo pelo qual o carregamento de projeto não foi alcançado, buscou-se analisar o tipo de falha ocorrida. A estrutura em questão poderia apresentar falhas na região tracionada dos tirantes, na região comprimida das bielas ou, ainda, nas regiões nodais submetidas a esforços de compressão.

Figura 64 – Ruptura da viga com otimização topológica



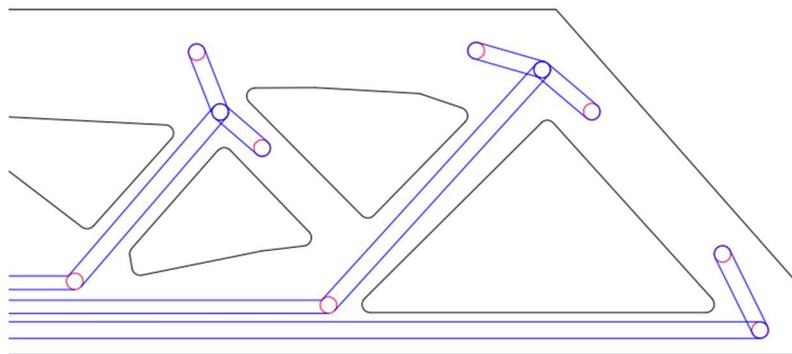
Fonte: Produção própria do autor.

Pode-se observar nas imagens mostradas acima que, no instante de aplicação do carregamento de falha, ocorreu uma ruptura brusca na região do nó 11 da viga. Nota-se que, tanto nas regiões das bielas, solicitadas à compressão, e dos tirantes, solicitados à tração, não houve falha. Todavia, após a ruptura ocorrida no nó, a

estrutura perdeu a sua integridade e passou a não apresentar mais o comportamento de uma treliça. Sendo assim, ocorreu a ruptura precoce da viga.

Este tipo de ruptura ocorreu devido a uma falha na etapa de concepção do projeto. O sistema de ancoragem definido para as fibras, com parafusos sextavados, do ponto de vista construtivo, apresentou um bom desempenho. Por outro lado, este sistema não foi capaz de realizar a distribuição das tensões na região nodal de maneira efetiva. Desse modo, como alternativa, aprimorou-se o sistema de ancoragem, o qual deverá ser testado novamente para que seja verificado o seu desempenho. São apresentadas abaixo três opções de nós com melhor engastamento das fibras de carbono.

Figura 65 – Sistema de ancoragem aprimorado



Fonte: Produção própria do autor.

Figura 66 – Gráfico de carregamento da viga de concreto armado convencional



Fonte: Produção própria do autor.

Pode-se observar, através do gráfico, que a ruptura da viga de concreto armado convencional, ocorreu com $t = 585s$, após atingir uma resistência ao carregamento de 9,8 tf. Inicialmente a viga havia sido dimensionada para resistir a um carregamento total de 4,8 tf. Sendo assim, o resultado foi satisfatório. Deve-se considerar que a NBR 6118 (ABNT, 2014) induz à utilização de uma série de coeficientes de majoração que acarretam uma maior segurança à estrutura e, como pôde-se identificar, a superação dos carregamentos projetados.

Figura 67 – Ruptura da viga de concreto armado convencional



Fonte: Produção própria do autor.

Pode-se observar na imagem mostrada acima que, no instante de aplicação do carregamento de falha, ocorreu uma ruptura gradual na região de aplicação de um dos carregamentos pontuais. Nota-se que, na região tracionada estava iniciando o processo de fissuração no concreto devido ao escoamento do aço. Todavia, a ruptura ocorreu por esmagamento, na região da aplicação do carregamento concentrado. Esse tipo de ruptura é comum nas regiões próximas a cargas pontuais onde as tensões são majoradas, como, por exemplo, apoios e o próprio carregamento aplicado. Cabe ressaltar que, por não ser ter acesso aos moldes para fabricação de corpos de prova, não foi possível verificar se o concreto atingiu a resistência característica de projeto.

5.1.3. Análise do sistema construtivo desenvolvido

Do ponto de vista do processo de desenvolvimentos de produtos de engenharia, principalmente aqueles que tem um viés voltado para a pré-fabricação, observa-se que poderia ter sido incluída uma etapa anterior a ele, na qual seria realizado um pré-projeto onde seria feita uma análise prévia, para que fosse definida a concepção do produto.

No caso da estrutura reforçada com fibra de carbono, a seção longitudinal apresentou espaços vazados nas regiões onde o elemento não seria solicitado, entretanto não apresentou alterações nas geometrias externas iniciais (seção transversal e comprimento). Por outro lado, a estrutura de concreto armado convencional, para que fosse possível conformar o detalhamento e o gancho de ancoragem, precisou ser aumentada em 15 centímetros em cada extremidade, portanto aumentou-se 30 centímetros do comprimento inicial considerado. Apesar disso, a distância entre eixos dos apoios continuou sendo igual a inicial, pois as partes adicionadas às extremidades da viga apenas estão simulando a amarração entre pilar e viga.

Inicialmente foi prevista a mesma resistência característica do concreto para ambos os elementos, todavia, durante a etapa de dimensionamento, buscou-se atender às diretrizes impostas pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Desse modo, observou-se que, pelo método das bielas e tirantes, a única maneira de aumentar a resistência à compressão das bielas seria aumentando a resistência à compressão de todo o elemento; chegando-se, assim, à resistência característica adotada de 50 MPa.

Conforme foi apontado acima, o objeto de comparação entre os elementos foi o carregamento que ambos deveriam resistir. Sendo assim, as estruturas apresentaram diferenças tanto nas suas constituições formais quanto nas suas estruturas internas, uma vez que a composição dos traços de concreto utilizados é diferente, assim como os elementos resistentes à tração adotados.

Pôde-se observar, ainda, na viga com otimização topológica, a ocorrência de uma leve assimetria na estrutura, algo que não deveria ocorrer, uma vez que o carregamento da estrutura é igualmente distribuído ao longo do comprimento do vão do elemento. Por sua vez, este fato se deve à conformação dos traços da viga, onde, visando a segurança da estrutura, foram traçadas linhas que confeririam seções

transversais às bielas e aos tirantes com áreas levemente superiores às determinadas pelo processo de otimização topológica.

Ao longo do desenvolvimento da solução procurou-se definir os processos de modo a otimizar o equilíbrio entre a atividade humana e a atuação do equipamento. Deve-se considerar que, para cada contexto, isoladamente, existe uma diferente combinação ótima na relação homem-máquina. Esta permite a obtenção de produtos com a melhor qualidade, o menor custo e o menor tempo.

Do ponto de vista do processo de manufatura das fôrmas internas, a utilização de impressão 3D é mais atrativa, uma vez que, por tratar-se de manufatura aditiva, ao contrário do corte de bloco de isopor, apresenta uma menor incidência de perdas inerentes ao processo. Já do ponto de vista da relação homem-máquina, originalmente ter-se-ia uma combinação ótima, pois a precisão no processo de manufatura é uma característica inerente às máquinas, enquanto que o corte do isopor trata-se de um processo artesanal, em que se tem uma precisão muito menor do que se teria com o uso de impressão 3D. Apesar das vantagens indicadas, não foi possível a elaboração do sistema de fôrmas internas compostos por impressão 3D, devido à impossibilidade de utilização dos laboratórios da universidade devido à pandemia de COVID-19. Entretanto, para que fosse feito um estudo de viabilidade mais preciso, considerou-se a utilização do mesmo.

Ao longo do processo de desenvolvimento de soluções inovadoras ocorre a experimentação e adaptação de técnicas já existentes que juntas são capazes de criar produtos e processos inovadores. Esse conceito vai diretamente ao encontro do segundo paradoxo da inovação, que, de acordo com Azambuja (2018), aponta que para criar é preciso copiar.

Durante o desenvolvimento da solução foram levantadas diversas possibilidades, porém manteve-se somente aquelas consideradas as melhores. Apesar disso, por tratar-se de uma tecnologia inovadora, ainda existem muitos pontos a serem aperfeiçoados ao longo do processo construtivo. Abaixo serão descritas as principais dificuldades encontradas durante a execução do processo.

Alguns dos processos executados foram realizados de modo artesanal, como foi o caso da marcação dos pontos onde deveriam ser posicionados os blocos de EPS que confeririam os vazios à viga. Este tipo de processo requer precisão, o que é uma

característica das máquinas, assim como a velocidade de execução. A artesanidade empregada pode acarretar um posicionamento incorreto dos elementos, o que influenciaria diretamente na capacidade da estrutura de receber carregamentos. Apesar disso, o resultado desejado foi obtido.

A maior dificuldade encontrada foi o posicionamento e tensionamento do elemento responsável por resistir à tração. Trata-se de um processo longo e repetitivo, o qual poderia ser executado por um braço mecanizado. Ao longo do posicionamento, apesar de ter sido feito um leve tracionamento da fibra de carbono, pôde-se identificar o relaxamento do material. Este fato refletiu diretamente no processo de concretagem. Devido ao relaxamento da fibra e à proximidade entre os parafusos utilizados nos nós e a fôrma lateral, o elemento resistente a tração apresentou-se muito próximo às paredes do painel de fechamento. Utilizou-se, na concretagem, uma mistura autoadensável; dispensando, assim, a utilização de vibrador. Apesar disso, foi necessária a utilização de uma haste metálica para auxiliar no lançamento do concreto, principalmente nas regiões dos tirantes, onde isto ocorria.

5.2. Estudo de Viabilidade Econômica

Visando a elaboração de um estudo de viabilidade econômica eficaz, deve-se levar em consideração alguns pontos fundamentais. É necessário que se faça um levantamento preciso do quantitativo de materiais e mão de obra que serão utilizados. Após essa etapa pode-se fazer o cálculo dos custos unitários diretos, os quais são relativos a materiais, mão de obra e equipamentos (ALY; MARANHÃO, [s.d.]).

5.2.1. Levantamento de Quantitativos

O levantamento de quantitativos trata-se de uma etapa de suma importância no projeto. Ao decorrer desta, são determinadas as quantidades dos materiais que deverão ser empregados para a materialização do projeto. Portanto, deve-se considerar que erros nessa etapa podem causar algum impacto no orçamento e, desse modo, afetar a viabilidade do mesmo.

5.2.1.1. Viga de Concreto Armado

A partir do projeto realizado para a estrutura, pode-se determinar as quantidades de materiais empregadas na construção do elemento. Para a estrutura de concreto armado foi feito o levantamento dos principais materiais empregados, são eles: vergalhões de aço CA-50, fôrmas de madeira compensada e concreto C30.

Tabela 9 – Densidade de aço CA-25 e CA-50

CA-25 E CA-50	
Diâmetro (mm)	Peso (Kg/m)
6,3 (1/4")	0.25
8,0 (5/16")	0.40
10,0 (3/8")	0.63
12,5 (1/2")	1.00
16,0 (5/8")	1.60
20,0 (3/4")	2.50
22,3 (7/8")	3.00
25,0 (1")	4.00
32,0 (1 1/4")	6.30

Fonte: Retirado do blog Gelson Luz Materiais no link: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2019/04/peso-especifico-do-aco-ca-50.html>

Para determinar a quantidade de aço necessária na viga de concreto armado convencional, deve-se considerar o peso/metro das barras de diversos diâmetros, pois a unidade utilizada nas composições de custo é o kg. Para isso, extrai-se os comprimentos das barras do projeto e multiplica-se esses comprimentos pelos correspondentes pesos/metro apontados na tabela acima.

Para calcular a área de fôrmas a ser utilizada, considerou-se a área da face inferior da viga, mais a somatória das áreas de fechamento lateral do elemento. Somou-se a essas quantidades uma pequena extrapolação do valor encontrado, para facilitar a fixação entre os painéis.

Finalmente, para que seja possível determinar o volume de concreto a ser utilizado, fez-se a cubagem da viga.

Tabela 10 – Quantitativo de materiais para concreto C30

Concreto C30 (a/c = 0,61)				
Insumo	RS/kg	1m ³	0,063m ³	RS/m ³
CPII F32	0,362	270	14,58	97,74
BRITA 0	0,03	1.010	54,54	30,30
AREIA GROSSA	0,035	880	47,52	30,80
SUPERPLASTIFICANTE	10	1,1	0,06	10,80
ÁGUA	0,009	165	8,91	1,49

Fonte: Produção própria do autor.

Tabela 11 – Quantitativos da viga de concreto armado

Viga Concreto Armado			
φ 10 mm	Comprimento	12,94	m
	Densidade	0,63	kg/m
	Peso	8,15	kg
φ 6,3 mm	Comprimento	10,01	m
	Densidade	0,25	kg/m
	Peso	2,50	kg
Concreto C30	Volume	0,054	m ³
Fôrmas	Área	0,90	m ²

Fonte: Produção própria do autor

5.2.1.2. Viga com fibra de carbono

Analogamente à viga de concreto armado convencional, a partir do projeto realizado para a estrutura, pode-se determinar as quantidades de materiais empregadas na construção da viga com otimização topológica. Para a estrutura, foi feito o levantamento dos principais materiais empregados. São eles: fibra contínua de carbono, fôrmas de madeira compensada, sistema de fôrmas internas e concreto C50.

Para determinar a quantidade de fibra necessária no elemento foram consideradas as quantidades determinadas em projetos para as linhas 1, 2 e 3.

Conforme foi apontado anteriormente, utilizou-se uma maior quantidade do material visando a segurança da estrutura.

Tabela 12 – Quantitativo de fibra de carbono

Elemento de Tração - Fibra de Carbono					
Descrição	Comprimento	Un	N° de Fibras	Comprimento	Un
Linha 1	1,75	m	38	66,12	m
Linha 2	1,60	m	35	56,36	m
Linha 3	1,20	m	29	35,10	m
Região Central (Reforço)	0,9	m	35	31,92	m
			Total	189,50	m

Fonte: Produção própria do autor.

Para calcular a área de fôrmas a ser utilizada, considerou-se a área da face inferior da viga que representa uma das laterais, mais a somatória das áreas de fechamento lateral do elemento, que representam as partes superior e inferior da estrutura. Somou-se a essas quantidades uma pequena extrapolação do valor encontrado, para facilitar a fixação entre os painéis.

Determinou-se, ainda, os volumes dos blocos de polímero EPS que compõem o sistema de fôrmas internas da estrutura. Os contornos, traçados a partir da topologia da estrutura, foram determinados no software AutoCAD, o que possibilitou fazer o cálculo do volume do material.

Tabela 13 – Quantitativo de fôrmas internas

Polímero			
Elemento	Área (cm ²)	Volume (m ³)	Peso (kg)
E1	0,01227	0,001840	1,914
E2	0,01280	0,001920	1,997
E3	0,00623	0,000935	0,972
E4	0,00460	0,000690	0,717
E5	0,00673	0,001010	1,050
E6	0,05837	0,008755	9,105
E7	0,00495	0,000743	0,773
E8	0,00436	0,000654	0,680
E9	0,00583	0,000875	0,910
E10	0,01327	0,001990	2,069
E11	0,01243	0,001865	1,940
Total	0,14184	0,02128	22,12657

Fonte: Produção própria do autor.

Finalmente, para determinar o volume de concreto utilizado, multiplicou-se as dimensões da viga e deste diminuiu-se o volume determinado para o sistema de fôrmas internas.

Tabela 14 - Quantitativo de materiais para concreto C50

Concreto C50 (a/c = 0,40)				
Insumo	R\$/kg	1m ³	0,049m ³	R\$/m ³
CPII F32	0,362	513	25,14	185,706
BRITA 0	0,03	949	46,50	28,47
AREIA GROSSA	0,035	744	36,46	26,04
SUPERPLASTIFICANTE	10	2,1	0,10	20,52
ÁGUA	0,009	205	10,05	1,845

Fonte: Produção própria do autor.

Tabela 15 – Quantitativos da viga com fibra de carbono

Viga Concreto Reforçado com Fibra de Carbono			
Fibra de carbono C8000 - 12K	Comprimento	189,50	m
	Preço/rolo	693,42	R\$/rolo
	Preço/m	0,14	R\$/m
Concreto C50	Volume	0,0327	m ³
Fôrmas	Área	0,96	m ²
Polímero 3D	Peso	22,13	kg

Fonte: Produção própria do autor.

Deve-se considerar que os valores obtidos em orçamentos podem variar, uma vez que os custos de mão de obra e equipamentos flutuam dependendo da região em que se encontra, da qualificação e da oferta de insumos. Além disso, ocorrem perdas que são inerentes aos processos produtivos e, por tratar-se de processos distintos, as perdas podem apresentar diferentes grandezas para cada um deles.

Para o estudo realizado, por tratar-se de um comparativo simples entre duas tecnologias distintas, não seria necessário considerar o BDI, entretanto adotou-se um

valor para os benefícios e despesas indiretas de 20%. Após a determinação do BDI, procedeu-se para a elaboração das composições de custo.

5.2.2. Composições de Custo

A etapa que sucedeu o levantamento de quantitativos foi a elaboração das composições de custos. Essa é uma ferramenta que proporciona alguns benefícios na elaboração de orçamentos, como por exemplo: “agilidade nos cálculos, auxílio no dimensionamento de equipes, auxílio na estimativa de quantitativos de materiais e equipamentos e estimativa de prazos de execução” (RIBEIRO, 2017, [n.p.]).

Para ser possível definir uma composição de custos que apresente a eficácia desejada, deve-se detalhar os insumos que serão utilizados no projeto. Além disso, deve-se conhecer os custos tanto para material quanto para mão de obra, os quais, conforme apontado anteriormente, podem flutuar. Para o projeto em questão, considerou-se os principais insumos contidos no seu escopo, aqueles que causariam um impacto considerável no custo dos elementos.

Tabela 16 – Insumos empregados no projeto

INSUMOS	
1	Sistema de fôrmas
1.1	Fôrmas de Madeira
1.2	Formas de Polímero ABS - 3D Printing
2	Elemento resistente à tração
2.1	Armaduras - CA50 Ø6.3mm
2.2	Armaduras - CA50 Ø10.0mm
2.3	Fibra de carbono C8000 - 12K
3	Elemento resistente à compressão
3.1	Concreto C30 - Autoadensável
3.2	Concreto C50 - Autoadensável

Fonte: Produção própria do autor.

Após serem levantados os insumos utilizados na elaboração do projeto, definiu-se os preços unitários para mão de obra e materiais para cada um deles. Apesar disso,

cabe ressaltar que para alguns dos insumos não foi possível levantar os custos para mão de obra, uma vez que se trata de uma tecnologia inovadora e que ainda não tem a sua utilização difundida no país.

Tabela 17 – Composição de custos para viga com aço

VIGA CONCRETO ARMADO									
Item	Discriminação	Und	Qtd.	Material (R\$)	Mão-de-Obra (R\$)	Vlr. Unit. (R\$)	Vlr. Total (R\$)	BDI (R\$)	Vlr. Total c/ BDI (R\$)
1.1	Formas de madeira	m ²	0,90	26,92	11,18	38,10	34,29	6,86	41,15
2.1	Armaduras - CA50 Ø6.3mm	kg	2,50	6,77	1,09	7,86	19,65	3,93	23,58
2.2	Armaduras - CA50 Ø10.0mm	kg	8,15	6,62	1,09	7,71	62,84	12,57	75,40
3.1	Concreto C30 - Autoadensável	m ³	0,054	171,13	182,68	353,81	19,11	3,82	22,93
						Total	R\$ 135,88	Total com BDI	R\$ 163,06

Fonte: Produção própria do autor.

Conforme está apontado na tabela acima, a maior parcela de contribuição para o custo da viga de concreto armado é referente ao elemento responsável por conferir resistência à tração a peça. O elemento apresentou um custo final de R\$ 163,06. Deste valor, cerca de 61% são relativos às armaduras da viga, 14% são relativos ao concreto autoadensável e os outros 25% relativos à montagem das fôrmas de madeira.

Tabela 18 - Composição de custos para viga com fibra

VIGA CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO									
Item	Discriminação	Und	Qtd.	Material (R\$)	Mão-de-Obra (R\$)	Vlr. Unit. (R\$)	Vlr. Total (R\$)	BDI (R\$)	Vlr. Total c/ BDI (R\$)
1.1	Formas de madeira	m ²	0,96	26,92	11,18	38,10	36,58	7,32	43,89
2.3	Fibra de carbono C8000 - 12K	m	189,50	0,112	-	0,11	21,22	4,24	25,47
3.2	Concreto C50 - Autoadensável	m ³	0,0327	262,58	182,68	445,26	14,57	2,91	17,49
1.2	Formas de Polímero - 3D Printing	kg	22,13	90,00	-	90,00	39,83	7,97	47,80
						Total	R\$ 72,77	Total com BDI	R\$ 134,65

Fonte: Produção própria do autor.

Diferente da estrutura de concreto armado convencional, a maior parcela contribuinte é referente ao sistema de fôrmas desenvolvido, que representa aproximadamente 68%. Para o estudo de viabilidade econômica considerou-se o insumo adotado na solução ideal, o sistema de fôrmas internas produzido através de manufatura aditiva, com a utilização do polímero ABS. Para esse sistema, estimou-se uma vida útil de 50 concretagens até o descarte. Desse modo o valor total foi dividido pelo número de utilizações. Este cálculo é uma estimativa teórica, na qual considerou-se somente o custo do material. O elemento responsável por conferir resistência à

tração à peça (fibra de carbono) tem um custo que representa 19% do valor total, sendo os 13% restantes relativos ao concreto autoadensável. A viga apresentou um custo final de R\$ 134,65. Cabe ressaltar que o custo dos parafusos posicionados nos nós foi desconsiderado para o cálculo. Isso ocorreu devido ao fato de que na solução completa fora prevista a utilização de um segmento de tubo de PVC com o objetivo de encapsular o parafuso. Desse modo, o parafuso poderia ser reaproveitado centenas de vezes e o custo associado a ele poderia ser diluído e representaria apenas fração de centavos, não tendo nenhuma relevância no custo final do produto.

5.2.3. Análise dos Resultados

Um dos principais pontos do projeto é a sua viabilidade econômica. A tecnologia desenvolvida, para que apresente competitividade no mercado, deve apresentar rentabilidade. De acordo com Duarte (2015), para analisar a viabilidade deve-se fazer análises do mercado, assim como avaliações financeiras.

A solução inovadora concebida caminha lado a lado com o conceito de pré-fabricação. O processo produtivo de elementos pré-fabricados é submetido a um maior controle de qualidade, o que acarreta a diminuição das perdas. Paralelamente, ao definir-se a utilização de sistemas de fôrmas reutilizáveis, reduz-se o custo de produção.

Verificou-se que houve uma redistribuição na proporcionalidade dos elementos utilizados. Observou-se uma diminuição na contribuição dada pelo elemento resistente à tração para o custo final. Por outro lado, o sistema de fôrmas teve sua parcela contribuinte aumentada no segundo caso. Isso se deve ao fato de que na estrutura com otimização topológica, se tem a adição de um sistema de fôrmas internas, para as quais estimou-se uma reutilização de 50 vezes. Devido a isso, o volume de concreto utilizado é reduzido, proporcionando uma economia desse insumo.

Ao realizar o orçamento e comparar as estruturas estudadas, observou-se que o elemento inovador desenvolvido apresentou um custo 17,5% inferior à viga de concreto armado convencional. Deve-se considerar ainda que com o ganho de escala na produção, existe a tendência da diminuição dos preços dos insumos. Estima-se

que seja possível reduzir em 50% o preço da fibra de carbono no caso de importá-la do exterior. Sendo assim, tornar-se-ia ainda mais viável a utilização desse material na composição dos elementos. Por outro lado, deve-se ressaltar que, devido ao fato de ter sido considerado somente os custos relativos ao material, desconsiderando, assim, a mão de obra e o equipamento, os resultados não são definitivos.

Além disso, deve-se considerar que a utilização do sistema proposto acarretaria a redução dos carregamentos aos quais estariam submetidas as estruturas, bem como o subsistema de fundações, uma vez que há a redução do volume do material e conseqüentemente do seu peso próprio. Desse modo, proporcionar-se-ia uma considerável economia neste outro sistema, que usualmente representa um custo de 3 a 7% do montante total de uma edificação.

6. Conclusões

A inovação tem um papel fundamental na construção civil. Apesar de tratar-se de uma indústria tecnologicamente divergente (AZAMBUJA, 2014), a implantação de melhorias em produtos e processos proporciona a redução nas perdas que são recorrentes. Ao longo do processo de desenvolvimento de solução procurou-se encontrar maneiras de agrupar procedimentos distintos visando alcançar a combinação ótima, o que, segundo Azambuja (2018), proporciona a obtenção de produtos com uma melhor qualidade, menor custo e uma maior agilidade no processo produtivo.

O terceiro paradoxo da inovação, de acordo com Azambuja (2018), afirma que apagar é uma ótima maneira de desenhar. Este foi adotado como uma premissa para o desenvolvimento de solução inovadora, uma vez que se buscou a elaboração de uma tecnologia que apresentasse propriedades inovadoras tanto no produto, quanto no processo, ao proporcionar a redução do volume de material necessário, possibilitando um menor consumo e a elaboração de elementos mais esbeltos.

A construção civil, paulatinamente, tem apresentado avanços em direção à industrialização do setor. Por tratar-se de uma indústria tecnologicamente divergente, é de praxe a incorporação de práticas seguidas por outros segmentos da indústria. Algumas dessas práticas apresentam a capacidade de mudar a forma como se aborda um processo ou como se constitui um produto e neste ponto surgem as inovações.

Neste trabalho foi estudado o desenvolvimento de tecnologia pré-fabricada de concreto com otimização topológica. Trata-se de uma inovação, tanto no produto, quanto no processo. Esse tipo de tecnologia ainda apresenta uma aplicação incipiente no mercado da construção civil, todavia apresenta-se como uma alternativa às estruturas convencionais utilizadas atualmente.

Por tratar-se de uma tecnologia inovadora no setor da construção civil, não somente no Brasil, mas em todo o mundo, até que seja efetivamente colocada em uso, deverá passar por estudos mais aprofundados, para que seja feito o seu aperfeiçoamento. Por outro lado, conhecendo as restrições impostas pelo projeto, principalmente a ausência de equipamentos para a execução de atividades de

precisão, os resultados obtidos durante o trabalho apresentaram-se similares aos esperados no início do projeto.

Visando a obtenção de resultados mais satisfatórios no desenvolvimento de projetos de engenharia, é de suma importância a busca pela inovação e a gestão da inovação. Tecnologias inovadoras funcionam de modo a agregar uma maior qualidade aos sistemas, assim como a possibilidade de proporcionar processos mais controlados. Em suma, é fundamental o papel de empresas ao incentivarem a busca pela inovação, pois desta ação decorrem os resultados positivos desejados.

Concluindo, é possível afirmar que a arte de inovar vai além de criar produtos e processos inusitados. Ela consiste na solução de problemas reais, cuja resolução, até então era desconhecida. Trata-se de um processo diferenciado no qual exige-se que se pense fora da caixa. Desse modo, a aplicação desse conceito deve ser cada vez mais difundida no dia a dia da construção civil, quer seja nas avaliações realizadas ou nas ações tomadas.

Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**, ABNT, 2014.

ADDITIVE Manufacturing vs Subtractive Manufacturing. **Creative Mechanisms Blog**, 04 jan. 2016. Disponível em: < <https://www.creativemechanisms.com/blog/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing> >. Acesso em: 20 abr. 2020.

ALY, Vitor Levy Castex; MARANHÃO, Flávio. **Composição de Custos, Preços e Orçamentos**. [s.d.]. 49 slides.

AMIR, Oded. **A topology optimization procedure for reinforced concrete structures**. Technion – Israel Institute of Technology. 32 páginas. 2012.

ARAÚJO, Joyce. **Compósitos de Polietileno de Alta Densidade Reforçados com Fibra de Curauá Obtidos por Extrusão e Injeção**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. 141 páginas. 2009.

AS 4 PRINCIPAIS formas de fabricar produtos de plástico. As técnicas e suas vantagens. **Indústria de Plásticos**, 23 jan. 2020. Disponível em: < <https://www.industriadeplasticos.com.br/as-4-principais-formas-fabricacao-de-produtos-de-plastico-e-suas-vantagens/> >. Acesso em: 29 abr. 2020.

AS VANTAGENS e desvantagens da impressão 3D. **Sigma Protótipos**, 16 ago. 2019. Disponível em: < <https://sigmaprototipos.com.br/vantagens-e-desvantagens-da-impressao-3d/> >. Acesso em: 20 abr. 2020.

AZAMBUJA, J. A. **AULA 9 – Otimização das soluções em Engenharia**. 2018. 21 slides.

AZAMBUJA, J. A. **Cinco Paradoxos da Inovação**. 2018. 13 slides.

AZAMBUJA, J. A. **Definição e Estruturação de Problemas**. 2018. 24 slides.

AZAMBUJA, J. A. **Metodologia para o desenvolvimento de produtos para a construção civil**. Monografia. NORIE, set. 2008.

AZAMBUJA, José. **Problema Real e Problema Aparente**. 2018. 6 slides.

AZAMBUJA, J. A. **Relação Homem-Equipamento**. 2018. 12 slides.

AZAMBUJA, J. A. Sustentabilidade na Construção: Em Busca de Novo Paradigma. Porto Alegre: Editora Uniritter. 391 P. 2014. ISBN: 978-85-60100-94-1

AZAMBUJA, J. A. **Teoria Geral da Edificação**. 2018. 60 slides.

BARBOSA, Filipe; WOETZEL, Jonathan; MISCHKE, Jan; RIBEIRINHO, Maria João; SRIDHAR, Mukund; PARSONS, Matthew; BERTRAM, Nick; BROWN, Stephanie. **Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity**. Mckinsey Global Institute, [s.l.], p. 3, fev. 2017.

BINA, P. **Concreto de pós reativos: uma revolução no conceito do concreto**. Revista Técnica, São Paulo, n. 8, p.50-51, jan./fev., 1999.

BOURGUIGNON, Jessé. Fibra de Vidro. **Construção de barcos**, 2010. Disponível em: < <http://www.construcaodebarcos.blogspot.com/2010/10/fibra-de-vidro.html> >. Acesso em: 4 fev. 2020.

BRASIL tem muitos desafios no sistema construtivo. **Jornal do Comércio**, Porto Alegre, 11 set. 2017. Disponível em: < https://www.jornaldocomercio.com/_conteudo/2017/08/especiais/construcao_civil_2017/581591-brasil-tem-muitos-desafios-no-sistema-construtivo.html >. Acesso em: 09 jul. 2020.

BRESLER, B.; PISTER, K. S. **Strength of Concrete Under Combined Stresses**. Journal Proceedings, [s.l.], n. 55, p. 321-345, jan. 1958.

CLARKSON, Max B. E. **A stakeholder framework for analyzing and evaluating corporations**. Academy Management Review., v. 20, n. 1, p. 92-117, 1995.

CONCRETO auto-adensável: principais características e aplicações. **Tecnosil**, 2017. Disponível em: < <https://www.tecnosilbr.com.br/concreto-auto-adensavel-principais-caracteristicas-e-aplicacoes-2/> >. Acesso em: 9 abr. 2020.

CRITÉRIO de falha de von Mises. WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. **Flórida: Wikimedia Foundation**, 2016. Disponível em: < https://pt.wikipedia.org/wiki/Crit%C3%A9rio_de_falha_de_von_Mises >. Acesso em: 7 jul. 2020.

DAL MOLIN, Denise Coitinho. **Concreto Auto-Adensável**. 2019. 104 slides.

D'ÁVILA, Marcos Akira. **Processo de Moldagem por Injeção de Polímeros Semicristalinos – Caracterização e Simulação Assistida por Computador**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 110 páginas. 1997.

DOWSETT, Harry Lyttelton; BARBER, Ronald Samuel Vernon. **Mold for the production of pre-stressed reinforced concrete sleepers**. Depositante: DOWSETT ENGINEERING CONSTRUCTION LIMITED. Titular: Harry Lyttelton Dowsett. US2397728A. Depósito: 23 mar. 1944. Concessão: 2 abr. 1946. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US2397728A/en>. Acesso em: 12 fev. 2020.

DUARTE, Jorge. O que é o Estudo de Viabilidade Econômica Financeira?. **Blog Fluxo Consultoria**, Rio de Janeiro, 12 jul. 2015. Não paginado. Disponível em: < <https://fluxoconsultoria.poli.ufrj.br/blog/estudo-viabilidade-economica-financeira/> > Acesso em: 18 jun. 2020.

ERICSON, Clifton A. **Hazard Analysis Techniques for System Safety**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

FIBRA de vidro: O que é e para que serve. **Sercel Soluções em Fibras**, 20 out. 2015. Disponível em: < <http://www.sercel.com.br/blog/fibra-de-vidro-blog/fibra-de-vidro-o-que-e-e-para-que-serve.html> >. Acesso em: 4 fev. 2020.

FLINN, Richard A.; TROJAN, Paul K. **Engineering Materials and Their Applications**. Boston: Houghton Mifflin Company, 1975.

FUJII, Hidetoshi. **Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding**. London: Elsevier, 2019.

GALLI, Cecilia Antunes. **Caracterização das Propriedades Mecânicas de Compósitos de Matriz de Epóxi com Fibras de Carbono Unidirecionais**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 40 páginas. 2016.

GRAUTE: o que é, para que serve. **Plastbrinq**, 2019. Disponível em: <<https://plastbrinq.com.br/graute/>>. Acesso em: 14 abr. 2020.

INOVAÇÃO de Produto x Inovação de Processo. **ABGI Group**, 22 fev. 2018. Disponível em: < <https://brasil.abgi-group.com/radar-inovacao/inovacao-tecnologica-inovacao-de-produto-x-inovacao-de-processo/> >. Acesso em: 2 out. 2019.

LEO MADEIRAS, MÁQUINAS E FERRAGENS. **Leo Madeiras**, [s.d.]. Categoria: compensados. Disponível em: <<https://www.leomadeiras.com.br/madeiras/compensados/040101>>. Acesso em: 3 jun. 2020.

LEONHARDT, Fritz; MÖNNIG, E. **Construções de concreto – Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. v.1. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 1982, 305p.

LORENZI, Luciani Somensi. **Stakeholders**. 2020. 6 slides.

MAZUMDAR, Sanjay K. **Composites Manufacturing – Materials, Product and Process Engineering**. CRC Press, 2002.

OSEJOS, Jaime Vinicio Molina. **Caracterización de Materiales Termoplásticos de ABS y PLA Semi-rígido Impresos en 3D con Cinco Mallados Internos Diferentes**. Dissertação de Mestrado. Escuela Politécnica Nacional. 114 páginas. 2016

PEREIRA, Caio. O que é Graute?. **Escola Engenharia**, 2018. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/graute/>>. Acesso em: 16 abr. 2020.

PROS and cons of CNC machining: Trained labor cost is reduced and it is also precise and controlled by computer. **Engineering My World**. Disponível em: <www.engineeringmyworld.org/pros-and-cons-of-cnc-machining/>. Acesso em: 20 abr. 2020.

RIBEIRO, Marcel. Composição de custos de serviços: entenda como fazer. **Blog Mais Controle, Juiz de Fora**, 04 out. 2017. Não paginado. Disponível em: <<https://maiscontroleerp.com.br/composicao-de-custos/>> Acesso em: 3 jun. 2020.

SALZANO, Oswaldo. **PLA ou ABS? Qual é o MELHOR MATERIAL para sua impressora 3D?**. 2019. (7m27s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=8mgjoNvkDJ8>>. Acesso em: 21 abr. 2020.

SANTOS, Luiz Ricardo dos. Fibra de Carbono. **Infoescola**, c2006-2020. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/quimica/fibra-de-carbono/>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

SCHNELLSPA. **ROBOMASTER 45 - Rebar Bending machine - Schnell Spa**. 2019. (2m48s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=8_8SLaVJMko>. Acesso em: 16 jan. 2020.

SEGIL, Jacob. **Handbook of Biomechatronics**. London: Elsevier, 2019.

SOARES, Fernanda Coutinho. **Laminados de Poli(ácido láctico)/Amido Termoplástico Recobertos com Quitosana Reticulada: Obtenção e Avaliação das Propriedades Físico-Químicas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 87 páginas. 2012.

TAMAYO, Jorge. **Aula 4 e 5 – Bases do Dimensionamento**. 2018. 37 slides.

VANDERLEI, Romel Dias; GIONGO, José Samuel. **Cadernos de Engenharia de Estruturas - Análise Experimental do Concreto de Pós Reativos: Dosagem e Propriedades Mecânicas**, v. 8, n. 33. 115-148. 2006.

VANTAGENS & Desvantagens De Fibra De Carbono. **TASUNS**, 2016. Disponível em: < <http://pt.custom-composite.com/news/advantages-disadvantages-of-carbon-fiber-1759145.html> >. Acesso em: 7 fev. 2020.

VANTAGENS e desvantagens dos compósitos de fibra de carbono (CFRP). **Meet you carbide**, 2019. Disponível em: < <https://www.meetyoucarbide.com/pt/advantages-and-disadvantages-of-carbon-fiber-composites-cfrp/> >. Acesso em: 5 mar. 2020.

VETTURAZZI, Rafael. Otimização Topológica: Como reduzir custos com matéria-prima e superar a crise. **Blog ESSS**, [s.l.], 01 jun. 2017. Não paginado. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/otimizacao-topologica-como-reduzir-custos-com-materia-prima-e-superar-a-crise/>> Acesso em: 15 ago. 2020.

ANEXOS

- **Ficha SikaGrout – 295 BR**



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

SikaGrout®-295 BR

GRAUTE CIMENTÍCIO AUTONIVELANTE, DE RETRAÇÃO COMPENSADA, LIGEIRAMENTE EXPANSIVO DE ALTO DESEMPENHO

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

SikaGrout®-295 BR é um graute cimentício monocomponente, de altas resistências mecânicas, pronto para uso, bastando adicionar água.

USOS

SikaGrout®-295 BR é indicado para todas as aplicações que requeiram elevadas resistências mecânicas, tanto iniciais como finais, no caso de:

- Preenchimento por gravidade sob placas de apoio;
 - Bases de máquinas estáticas;
 - Recuperação de vigas e bases armadas para pontes rolantes e guindastes;
 - Ancoragens de: elementos metálicos (armaduras, chumbadores, etc.), postes metálicos e de concreto, colunas pré-fabricadas, etc;
 - Preenchimento de fendas e cavidades confinadas no interior da massa de concreto;
 - Grauteamento de bases e juntas em torres eólicas;
- Não deve ser empregado para nivelamento de superfícies livres e não confinadas (ex.: nivelamento de pisos).

CARACTERÍSTICAS / VANTAGENS

- Fácil mistura e aplicação;
- Ótima fluidez para lançamento por gravidade;
- Bombeável;
- Isento de cloretos e partículas metálicas. Por este motivo não se oxida em contato com a umidade, protegendo as armaduras e partes metálicas contra corrosão devido seu pH básico;
- Ligeiramente expansivo;
- Resistências mecânicas elevadas, com rápido desenvolvimento das mesmas;
- Boa aderência ao concreto, argamassa e aço;
- Ótima impermeabilidade;
- Não é corrosivo nem tóxico.

DADOS DO PRODUTO

Base química	Cimento Portland, areia de quartzo e aditivos especiais.
Embalagem	Paletes com 40 sacos de 25 kg.
Aspecto / Cor	Pó cinza.
Prazo de validade	6 meses a partir da data de produção.
Condições de estocagem	Estocado apropriadamente, nas embalagens originais e intactas, em temperaturas entre +5°C e +35°C. Protegido da luz direta do sol, da umidade e do gelo.
Densidade	~ 2,25 kg/litro (graute fresco) (EN 12390-7)

Ficha Técnica de Produto
SikaGrout®-295 BR
Julho 2017, Versão 01.01
020201010010000175

DADOS TÉCNICOS

Resistência à Compressão	Idade	5°C	20°C	35°C	EN 12190 (40mm x 40mm x 160mm)	
	1 dia	2,5 MPa	30 MPa	45 MPa		
	2 dias	9,5 MPa	40 MPa	50 MPa		
	3 dias	34 MPa	70 MPa	80 MPa		
	7 dias	45 MPa	80 MPa	85 MPa		
	28 dias	55 MPa	90 MPa	95 MPa		
	Idade	5°C	20°C	35°C		EN 206-1 (150mm x 300mm)
	1 dia	2 MPa	25 MPa	35 MPa		
	2 dias	7 MPa	30 MPa	40 MPa		
	3 dias	30 MPa	60 MPa	65 MPa		
7 dias	40 MPa	70 MPa	75 MPa			
28 dias	50 MPa	75 MPa	80 MPa			
Módulo de elasticidade à compressão	> 40 GPa (28 dias)		(EN 13412)			
Resistência à flexão	Resistência	24 horas	03 dias	07 dias	28 dias	
	Flexotração	10 MPa	15 MPa	20 MPa	25 MPa	
(EN 12190)						
Contração	~ 0,65 mm/m (23°C / 50% U. R.)			(EN 12617-4:2000)		
Expansão	Expansão a 24 horas: 1% máximo			(CRD-C 621-83)		
Absorção capilar	Absorção de água por capilaridade: < 0,5 kg.m ⁻² .h ^{-0,5}			(EN 13057)		

INFORMAÇÃO SOBRE A APLICAÇÃO

Proporção da mistura	Min. 0,12 litros/kg : 3,00 litros de água por saco de 25 kg.	
	Máx. 0,13 litros/kg : 3,25 litros de água por saco de 25 kg.	
Consumo	2,25 kg de mistura fresca /m ² /mm de espessura ou, 1,99 kg de SikaGrout®-295 BR + 0,261 kg de água /m ² /mm de espessura ou, 80 sacos de 25 kg de SikaGrout®-295 BR + 260 kg de água /m ³ de graute.	
	Nota: A quantidade de água poderá variar em função da consistência desejada na aplicação e fatores como temperatura, vento, etc. Os consumos informados são teóricos e não consideram perdas decorrentes da mistura e aplicação.	
Espessura da camada	mín. 10 mm. / máx. 200 mm.	
Fluidez	t _{inicial} > 280 mm (flow table)	(EN 1015-3)
	t _{30seg} > 700 mm (flow channel)	(EN 13395-2)
	t _{inicial} > 1000 mm / t _{120min} > 650 mm	(NBR 15823-2)
Temperatura ambiente	Min. +5°C / Max. +35°C.	
Temperatura do substrato	Min. +5°C / Max. +35°C.	
Pot life	20°C / 50% U.R.: 120 min.	
	35°C / 50% U.R.: 90 min.	

INSTRUÇÕES DE APLICAÇÃO

QUALIDADE DO SUBSTRATO / PRÉ-TRATAMENTO

A superfície deverá estar perfeitamente limpa, isenta de óleos, graxas, pó, restos de pintura, nata de cimento, materiais soltos, incrustações, algas, etc. ou quaisquer outros materiais que prejudiquem a perfeita aderência do SikaGrout®-295 BR. Partes metálicas devem se encontrar livres de oxidação e pontos de corrosão. A limpeza das superfícies, caso necessário, deverá ser realizada preferencialmente por procedimentos mecânicos.

Saturar previamente o substrato sem deixar empoçamento de água sobre a superfície, apresentando a condição de saturada e seca. A aplicação do SikaGrout®-295 BR deve se iniciar tão logo a superfície úmida perca o brilho.

MISTURA

Para cada saco de 25 kg são necessários 3,00 litros de água. Recomenda-se, para a mistura de 1 saco, utilizar uma hélice de mistura acoplada a uma furadeira de baixa rotação (400 a 500 rpm) e, para maiores quantidades, um misturador de ação forçada tipo betoneira de eixo inclinado em obras de menor responsabilidade ou misturador / argamassadeira de eixo vertical em obras de maior responsabilidade. Adicionar primeiro no misturador aproximadamente 70% da água de amassamento e os 25 kg do SikaGrout®-295 BR (pó), misturando por 3 minutos e, em seguida adicionar os 30% restantes da água (conforme indicado). Misturar-se por mais 2 minutos, até o graute apresentar aspecto uniforme e homogêneo. Dependendo da temperatura ambiente e da consistência desejada, a quantidade de água pode variar de 3,00 a 3,25 litros por embalagem. Não fracionar as embalagens.

APLICAÇÃO

- O grauteamento deve ser contínuo, realizado a partir de apenas um lado do elemento estrutural, sempre lançando o SikaGrout®-295 BR da menor distância de percurso possível.
- Para facilitar o lançamento em grandes volumes, pode-se utilizar barras de aço, correntes ou vibradores de imersão.
- O lançamento deve ocorrer de forma contínua, garantindo-se o preparo da quantidade suficiente para cada aplicação.
- Para preenchimentos sob placas, as mesmas deverão prever um orifício de entrada do graute e outro para facilitar a saída do ar, facilitando o processo de preenchimento por agitação mecânica da mistura.

TRATAMENTO DE CURA

Realizar cura úmida durante no mínimo 3 dias ou aplicar membrana de cura química.

LIMPEZA DE FERRAMENTAS

Limpar todas as ferramentas e equipamentos de aplicação com água limpa imediatamente após o uso. Material endurecido/curado só poderá ser removido mecanicamente.

VALOR BASE DO PRODUTO

Todos os dados técnicos aqui contidos são baseados em testes de laboratórios. Medidas de valores em condições reais podem variar devido a condições fora de nosso controle.

RESTRIÇÕES LOCAIS

Para maiores informações sobre manuseio, estocagem e disposição dos resíduos consulte a versão mais recente de nossa Ficha de Segurança do Material que contém os dados disponíveis, das propriedades físicas, de ecologia, de toxicidade, e outros dados de segurança pertinentes.

ECOLOGIA, SAÚDE E SEGURANÇA

Para maiores informações sobre manuseio, estocagem e disposição dos resíduos consulte a versão mais recente de nossa Ficha de Segurança do Material que contém os dados disponíveis, das propriedades físicas, de ecologia, de toxicidade, e outros dados de segurança pertinentes.

NOTA LEGAL

As informações e, em particular, as recomendações relacionadas à aplicação e à utilização final dos produtos Sika são fornecidas de boa-fé e baseadas no conhecimento e na experiência de uso desses produtos, desde que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais. Na prática, as variações no estado do material, nas superfícies e nas condições de aplicação em campo são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão de um determinado produto para um determinado fim, nem quaisquer responsabilidades decorrentes de qualquer relacionamento legal entre as partes poderão ser inferidas dessas informações ou de quaisquer recomendações dadas por escrito ou por qualquer outro meio. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceitas estão sujeitas às condições de venda e de entrega vigentes. Os usuários deverão sempre consultar as versões mais recentes das fichas técnicas de cada produto (disponíveis mediante solicitação).

Sika S.A.
 Av. Doutor Alberto Jackson Byington no 1525
 Vila Menck
 CEP-06276000
 Osasco
 SP
<http://bra.sika.com/>



Fundação Responsável

Associação Brasileira de Cimento Portland

Membro

SikaGrout-295BR_ot_BR_(07-2017)_1_1.pdf

Ficha Técnica de Produto
 SikaGrout®-295 BR
 Julho 2017, Versão 01.01
 020201010010000175

- Ficha Roving de Carbono 3K base PAN

 Ficha Técnica de FIO			
Artigo	C-2000/1-0	Data da Emissão	14/07/2004
Grupo de Produto	Fios	Data da Revisão	16/12/2014

Matérias Primas Requeridas	
Materia Prima	Roving de Carbono 3K Base PAN
Acabamento do Fio	C
Código TEXIGLASS da Resina	NA

Informações de Torção				
Tipo de Torção	Sem Torção.			
Tipo de Embalagem (bobina)	Carretel			
Parâmetros	Unidade	Mínimo	Nominal	Máximo
Título Final	Tex	180	200	220
Título de Fio Singelo	Tex	180	200	220
Número de Filamentos	No. Real	2775	3000	3225
Número de Fios (de pernas)	No. de Fios	1	1	1
Número de torções	TPM	0	0	0
Equilíbrio	Voltas	0	0	0
Sentido Final	S ou Z	S	S	S
Peso por bobina	Kg	2,4	3,0	3,6
Comprimento/massa	m/Kg	4250	5000	5750
Comprimento por embalagem	m/bobina	12000	15000	16500
Carga de Ruptura Teórica	Kgf	41,44	51,8	56,98
Resistência à tração	MPa	3243	3450	3657
Módulo de elasticidade	GPa	216	227	238
Densidade	g/cm ³	1,77	1,80	1,83
Elongação	%	1,275	1,50	1,73
Porcentagem de Acabamento em Peso	%	1,2	1,4	1,6

Informações Adicionais	
Composição do Fio	100% Fibra de Carbono.
Validade	Indeterminada.
OBSERVAÇÕES:	

Data	16/12/2014
Nome e assinatura do revisor	Luis Fernando Barbi

- Ficha Roving de Carbono 12K

			
Ficha Técnica de FIO			
Artigo	C-8000/1-0	Data da Emissão	14/07/2004
Grupo de Produto	Fios	Data da Revisão	16/12/2014

Matérias Primas Requeridas	
Materia Prima	Roving de Carbono 12K
Acabamento do Fio	C
Código TEXIGLASS da Resina	NA

Informações de Torção				
Tipo de Torção	Sem Torção.			
Tipo de Embalagem (bobina)	Carretel			
Parâmetros	Unidade	Mínimo	Nominal	Maximo
Título Final	Tex	720	800	880
Título de Fio Singelo	Tex	720	800	880
Número de Filamentos	No. Real	11100	12000	12900
Número de Fios (de pernas)	No. de Fios	1	1	1
Número de torções	TPM	0	0	0
Equilíbrio	Voltas	0	0	0
Sentido Final	S ou Z	NA	NA	NA
Peso por bobina	Kg	3,2	4,0	4,8
Comprimento/massa	m/Kg	1063	1250	1438
Comprimento por embalagem	m/bobina	4000	5000	5500
Carga de Ruptura Teórica	Kgf	165,76	207,2	227,92
Porcentagem de Acabamento em Peso	%	1,2	1,4	1,6

Informações Adicionais	
Composição do Fio	100% Fibra de Carbono.
Validade	Indeterminada.
OBSERVAÇÕES:	

Data	16/12/2014
Nome e assinatura do revisor	Luís Fernando T. Barbi