

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO - Engenharia Mecânica
Disciplina MEC041 - Trabalho Final de Graduação II

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UMA ESCORA PRFV PARA APOIO PROVISÓRIO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Rafael Rigo

148456@upf.br

Gustavo Prates Mezzomo

gustavomezzomo@upf.br

Comissão Examinadora – Carlos Edmundo de Abreu e Lima Ipar / Fabio Goedel

RESUMO

O planejamento da construção civil está interligado a uma infinidade de itens aplicados a curto e a longo prazo. Quando se trata do canteiro de obras, as construções normalmente são caracterizadas pelo empilhamento, descartes e reutilização constante de materiais durante sua execução. Sendo assim, a proposta do presente trabalho foi o desenvolvimento de um novo modelo de escora de fibra, viabilizando a utilização e otimização do material, reduzindo custos, evitando desgastes por corrosão e principalmente aumentar a reutilização da escora. A maior dificuldade encontrada sobre escoras em aço existentes no mercado se dá devido dificuldades de nivelamento, grande espaço ocupado, descartes (no caso de escoras de madeira), peso elevado, corrosão e ao grande volume ocupado quando o material não está em uso. Um diferencial do produto projetado deve-se a uma larga vantagem na redução de peso, aumento da vida útil, facilidade na fabricação e manuseio da escora. O conceito do projeto, dimensionamento da barra comprimida e elementos de fixação foram estudados no decorrer deste trabalho. Sendo assim, foi possível desenvolver toda a análise estrutural (levantamento das cargas, análise da escora até o colapso, comparação de resultados entre a escora de aço e a escora de fibra). Foram realizados testes e análises numéricas com o auxílio do *software Mastan*, para validação de resultados.

Palavras-chave: melhoria; escora; tubo; compósito; projeto.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade global de uma edificação está associada diretamente ao conceito de equilíbrio, caracterizada pelos valores de deslocamento dos seus pontos. Toda estrutura está sujeita ao emprego de forças e ações externas (força devido ao vento, peso próprio da estrutura e sobrecargas), sua altura, esbeltez, a rigidez de seus elementos, as ligações estão diretamente ligados e desempenham uma determinada função (DINIZ, LAGES e BARBOZA, 2019). Assim, os principais requisitos de engenharia aplicados para cada elemento estrutural devem ser preenchidos com a máxima atenção e menor custo, baseando-se pelas características de rigidez, estabilidade e resistência.

Com o conhecimento das cargas que estão aplicadas sobre a edificação, é fundamental que toda estrutura garanta a estabilidade durante e após a sua construção. Sendo assim é imprescindível conhecer a intensidade, direção e sentido das forças atuantes sobre a estrutura, para que a concepção estrutural seja coerente com o caminho que essas forças devam percorrer até a dissipação ao solo e todos os dados estruturais sejam dimensionados adequadamente. Cada elemento portante de uma edificação deve resistir aos esforços incidentes e transmiti-los a

outros elementos, através de estruturas provisórias, nós, uniões estruturais que possam transferir os esforços solicitantes, sem que haja deformações inconvenientes.

Desde o momento em que todas as forças atuantes sobre a edificação são conhecidas, se dá início ao processo construtivo. Colunas, vigas, lajes são os itens mais comuns e imprescindíveis dentro de uma edificação. Para o auxílio e confecção destes elementos é comum a utilização de “elementos não estruturais”, conhecidos também por elementos provisórios, escoras, estruturas secundárias, servindo para a confecção dos elementos estruturais e fundamentais para a edificação. Estes itens têm função determinante para manter a forma, precisão e estabilidade durante a cura do concreto.

Diante deste panorama, o presente trabalho tem a proposta de desenvolver o projeto de um sistema de escora diferenciado, destinado a auxiliar a execução de edificações dentro da construção civil. O desdobramento para a confecção da escora PRFV (polímero reforçado com fibra de vidro) terá como principais vantagens o baixo custo para fabricação, alta resistência a corrosão, facilidade de manuseio e redução de peso próprio, quando comparado a produtos existentes dentro do mercado. Outro diferencial apontado será a maior reutilização da escora PRFV, podendo ser aplicada para diversas obras e edificações. Além de ser um elemento provisório, a escora desenvolvida tem como ponto estratégico uma considerável redução de custos dentro da construção civil, uma vez que ao se utilizar escoras em madeiras, dificilmente há reaproveitamento de material. Outro ponto importante ao se comparar a escora PRFV com a escora de aço será uma redução de peso e um aumento na vida útil, por ser um elemento anticorrosivo. Com foco em atender aos critérios de segurança e estabilidade, busca-se dentro deste projeto obter e analisar uma curva tensão/deformação para validação de dados.

O processo de cura é muito importante dentro da execução da obra. A estrutura da edificação fica totalmente suspensa e dependente de elementos provisórios (escoras, andaimes, cimbres) não estruturais, porém extremamente importantes para que a cura ocorra de forma gradativa e lenta. Segundo American Concrete Institute (2014), aconselha ser bastante comum que os concretos necessitem ser curados apropriadamente até que atinja 70% de sua resistência especificada, mas também adverte que em alguns casos, onde a resistência deva atender critérios muito justos, a cura pode durar muito mais tempo. Durante este período é fundamental que a estrutura de apoio fique inteiramente estática e apoiada sobre as escoras.

Para que os elementos estruturais (colunas, vigas e lajes) cumpram com as suas principais características de estabilidade, rigidez e resistência, as escoras devem atender e suportar o peso do concreto. É fundamental manter toda a estrutura de apoio estática, sem que haja qualquer movimentação dos elementos de escora utilizados. Segundo Model Code (2010), a confecção estrutural irá obter geometria desejada em projeto com confiabilidade, quando o concreto for tratado e curado cuidadosamente. Sendo assim, é recomendado seguir e respeitar regras e procedimentos expostos na ISO 22966, que especifica diferentes processos de cura para cada ambiente. Deste modo, as escoras são fundamentais, consideradas elementos estruturais provisórios pois absorvem toda a carga do concreto, operadores, e substâncias específicas para que ocorra a cura.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver a análise numérica uma escora PRFV, que seja capaz de suportar cargas axiais provisórias, provenientes de lajes pré-moldadas, vigas ou afins durante o processo da construção civil.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Conhecer as principais propriedades mecânicas de materiais compósitos a base de fibras, ou seja, obter a curva tensão-deformação para análise estrutural;

- Realizar a construção de modelos numéricos não lineares de coluna comprimidas utilizando software de análise estrutural (*Mastan*) para determinação da carga resistente;
- Comparar o comportamento axial de escoras metálicas e escoras PRFV através de modelos numéricos;
- Avaliar o desempenho da escora PRFV sob aplicação de carga axial com imperfeições geométricas iniciais;

A importância de materiais e elementos considerados não estruturais são fundamentais para que haja uma boa qualidade e precisão durante o processo construtivo de uma edificação, sendo assim alguns conceitos e os principais objetivos deste trabalho serão apresentados a fim de possibilitar a compreensão deste estudo, explanando requisitos básicos e fundamentais para confecção de escoras em material compósito, comparando-os com desempenho de escoras em tubos de aço.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica busca apresentar modelos de escoras existentes, a fim de esclarecer e desenvolver um modelo numérico de uma escora em material compósito. Esta descreverá breves conceitos sobre as principais características mecânicas de um material compósito, com intuito em plotar um gráfico contendo a curva tensão-deformação para análises estruturais da escora. Será realizada uma breve pesquisa relacionando patentes em escoras de aço, bem como esclarecer o seus funcionamentos e aplicação do sistema na construção civil.

Será também apresentado o processo de fabricação por pultrusão, aplicado em materiais compósitos a base de fibras de vidro, com intuito em projetar uma escora no qual o perfil selecionado atenda aos requisitos de carga e resistência. Através da aplicação da carga na escora PRFV, com o auxílio de um *software* de análise dimensional *Mastan*, busca-se analisar o comportamento e desempenho estrutural do novo modelo de escora.

2.1 Modelos de escoras

Com uma surpreendente variação arquitetônica e com o envolvimento de artes adentrando nas edificações, a construção civil tem sido um grande aliado quando se trata de criatividade em geometrias espaciais. Sendo assim, a engenharia propõe-se a ofertar e desenvolver modelos e estruturas, que atendam aos critérios e formas solicitadas em projetos capazes de dar garantia, segurança e estabilidade aos seus usuários.

2.1.1 Escora de madeira

Uma das primeiras opções de escora utilizada para a confecção de formas geométricas em concreto, foram escoras em barras roliças de madeira. Ainda com uma vasta aplicação na construção de pequenas edificações, escoras de madeira são adotadas devido seu baixo custo e grande oferta de mercado.

Com uma boa variação de diâmetro por metro, as escoras em madeira estão perdendo força no mercado da construção civil, uma vez que sua característica física e mecânica pode variar com muita facilidade. É muito importante salientar que, ao se utilizar escora de madeira, é crucial ter conhecimento sobre as características físicas e mecânicas da madeira, módulo de elasticidade, resistência, e seus estados limites.

A madeira mais utilizada como escora é a madeira de eucalipto, pois possui alta resistência a compressão e baixo custo. Segundo a norma ABNT NBR 7190 (1997), barras curtas submetidas a compressão axial, permite-se ignorar a influência de uma leve inclinação de até 6°, em relação ao eixo longitudinal da fibra da madeira a ser comprimida. Por se tratar de escoras de madeira estas imperfeições acontecem frequentemente, sendo fundamental

considerar que para estes elementos não padronizados as inclinações são maiores. Deste modo se faz necessário considerar uma redução de resistência.

O escoramento em madeira não proporciona uma boa visualização da edificação quando encontra-se em fase construtiva. Além de uma má impressão devido ao grande número de estacas locadas uniformemente sobre o elemento a ser concretado, as escoras necessitam de travamento entre elas para garantir estabilidade. Também vale salientar que ao se tratar de escoras em madeira bruta, seu comprimento pode variar facilmente de elemento para elemento. Sendo assim, se faz necessário a utilização de cunhas para que ocorra o nivelamento adequado para confecção da estrutura de concreto. A Figura 1 apresenta a distribuição de roletes de madeira para construção de uma ponte em concreto armado.

Figura 1 - Escoramento em madeira.



Fonte: Construção fácil (2021).

O escoramento em madeira, além de dificultar a precisão solicitada em projeto, ainda fica totalmente dependente de sarrafos e cunhas para que assim haja melhor acabamento e precisão. Estes moldes de madeira estão cada vez mais em desuso, por necessitar de amplo espaço para armazenagem dentro do canteiro de obra, por manter um aspecto de desorganização, mal planejamento e também por não ter uma longa vida útil (CONSTRUÇÃO FÁCIL, 2021). Desta forma fica evidente que, ao término da construção as escoras em madeira acabam se tornando resíduo e sendo descartadas.

2.1.2 Escoras em tubo de aço

De maneira geral, as escoras em tubo de aço existem em diversos modelos de composição, porém vários modelos possuem alguns itens em comum. As subdivisões de escoras em aço vêm sendo adaptadas para cada situação. Isso ocorre devido a suas características de uso terem enorme vantagem, quando comparada a escoras de madeira.

As principais características das escoras em aço tornam este modelo de escora um modelo vantajoso, oferecem maior segurança, alta durabilidade, fácil armazenamento e maior reaproveitamento em múltiplas edificações (WEIHERMANN e WETTER, 2016). Escoras em aço são altamente resistentes, possuem maior similaridade entre si e aceitam maiores cargas distribuídas com maior confiabilidade, uma vez que há conhecimento de todos seus materiais, ligas, resistências e vida útil.

Além de dar aspecto de limpeza e organização, as escoras metálicas ocupam pequeno espaço de armazenagem, elas reduzem de tamanho devido terem seus tubos acoplados. A Figura 2 representa o escoramento de uma laje através de escoras de aço. Pode-se visualizar na imagem, como a edificação oferece um aspecto visual melhorado quando comparado a escoras convencionais em madeira.

Figura 2 - Escora metálica com sistema de trava.



Fonte: JUND MEGA (1998).

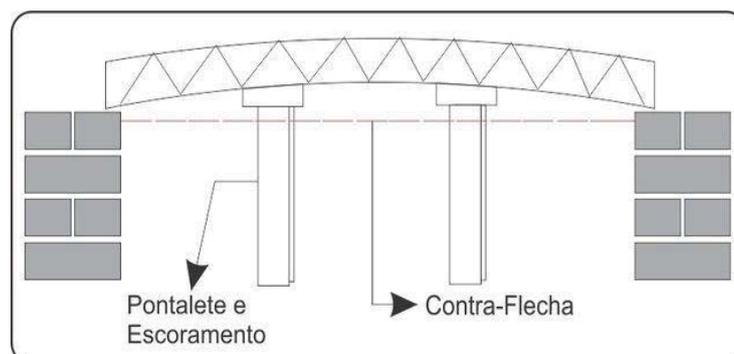
Segundo Weihermann (2016), um dispositivo com rosca e travamento embutido na escora faz com que este modelo de escora especificamente não desacople os tubos, que por sua vez trabalham como luva. Um tubo desloca-se internamente enquanto o outro tubo serve como guia. O objetivo do presente modelo é garantir a união da barra mecânica e seus suportes a fim de evitar quaisquer desacoplamentos, evitando que peças se desprendam e causem acidentes de trabalho.

O modelo de escora em aço, com suporte de rosca acoplado entre os tubos, facilita o manuseio, instalação, nivelamento, e pressão requerido em projeto. Uma situação muito presente no escoramento de lajes e vigas é a contra flecha, onde deve-se prever em projeto um pequeno desnível no sentido ascendente, distribuído ao longo do elemento a ser concretado.

Geralmente vigas e lajes com vãos elevados, que absorvem cargas verticais estão suscetíveis à deformação. Segundo a norma ABNT (NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto, 2003), deve-se validar o dimensionamento estrutural respeitando a condições de equilíbrio, compatibilidade e carregamento. A contra flecha é projetada para que após a cura do concreto, vigas ou lajes se deformem de maneira que o concreto absorva este pequeno desnivelamento previsto em projeto.

Na Figura 3, projeta-se a contra flecha para aplicação do desnivelamento através de escoras antes da concretagem da viga. Estas situações ocorrem frequentemente na concretagem de lajes e vigas. Sendo assim, as escoras metálicas com rosca se adaptam bem por sua fácil regulagem.

Figura 3 - Contra flecha prevista em projeto para distribuição das escoras.



Fonte: Adaptado de Construção Fácil (2021).

A linha tracejada (destacada como contra flecha) representa a posição final em que a viga que a ser concretada irá obter (representada por uma treliça em arco). A contra flecha só acontecerá após a remoção de todas as escoras de apoio a concretagem da viga. Através da remoção das escoras, a viga de concreto absorve as cargas de tensão e compressão que eram distribuídas uniformemente sobre as escoras e toma sua posição real, prevista em projeto.

2.1.3 Torres de carga modular

Um dos modelos de escoras mais eficiente e com maior capacidade de carga, as torres de carga modular são conjunto de estruturas auxiliares provisórias, composta por inúmeros elementos padrões que servem como apoio da estrutura a ser concretada. Os modelos de torres de carga metálicas são muito versáteis, podendo serem acopladas uns entre os outros mantendo a estabilidade, servindo como plataformas e escadas e atendendo alturas extremamente variadas.

As estruturas provisórias em torre de carga são compostas normalmente por cabeçais, colunas, vigamentos, contraventamentos e travamentos formados por tubos de paredes finas (CONSTRUÇÃO FÁCIL, 2021). Estas estruturas temporárias servem como apoio para suportar movimentação de materiais, equipes de operários, equipamentos e a concretagem até sua cura.

Verdadeiras tramas montadas, as estruturas de torres de carga representam estruturas espaciais e a importância da engenharia aplicada sobre distribuição de cargas para cada elemento estrutural. A Figura 4 apresenta a visualização de uma torre de escada, plataforma e o entrelaçado de torres para confecção de um reservatório elevado em concreto armado.

Segundo a Construção Fácil (1998), por sua versatilidade, as torres de cargas suportam uma carga de 3 a 5 toneladas por poste vertical, podendo variar conforme sua disposição de montagem. Podem ser acoplados em torres, em formas lineares, circulares e poligonais, com utilização de qualquer modulação e altura, facilitando as distribuições de carga em cada elemento.

Figura 4 – Estrutura de andaimes para concretagem de reservatório.



Fonte: Adaptado de Construção Fácil (2021).

O não planejamento e controle construtivo pode fazer com que os custos de uma edificação se elevem rapidamente. Com o planejamento antecipado, todas as edificações podem cumprir cronogramas construtivos eficientes (LUIZ, 1977). Uma breve comparação entre segurança, produtividade, sustentabilidade e custo pode dar velocidade a fases de concretagem

por exemplo. De acordo com a Tabela 1, apresenta-se um comparativo referente a três tipos de escoras mais utilizadas na construção civil.

Tabela 1 - Tabela comparativa entre os sistemas de escoramento.

	Escoras de madeira	Escoras metálicas	Escoras em torres metálicas
Custo inicial	Baixo	Médio	Médio/alto
Durabilidade	Baixa	Alta	Alta
Movimentação	Manual	Manual	Manual ou mecânica
Produtividade	Baixa	Média/alta	Média
Segurança	Baixa	Média	Média/alta
Flexibilidade	Baixa	Média	Alta
Facilidade de ajustes	Baixa	Alta	Alta
Estabilidade	Baixa	Baixa	Alta
Pé-direito	Até 3 m	Até 4,5 m	Qualquer altura
Peças soltas	Média	Média	Variável

Fonte: O Autor (2021).

Percebe-se uma grande desvantagem na utilização de escoras em madeira, principalmente por ter baixa durabilidade e produtividade. Já as escoras e torres metálicas atendem elevadas alturas de pé-direito, suportando grandes cargas, além de poderem ser reutilizadas.

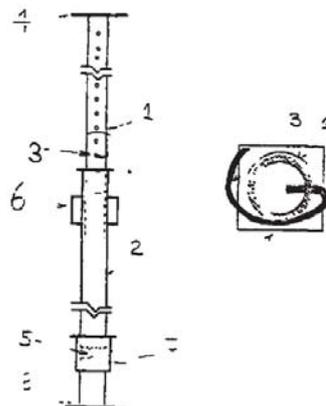
2.2 Patentes

Foi realizado uma pesquisa junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) a fim de verificar os produtos patenteados e resguardados. A busca realizada em 26/04/2021 pelo termo “escora” como título de registro, teve diversos resultado de processos, com uma grande variedade de materiais, configurações e características.

2.2.1 Primeiro sistema de escora metálica patenteada

Um dos primeiros sistema de escora metálica patenteado tem como número de depósito MU 7502584-1 U, com data de solicitação de depósito em 13/11/1995, onde o sistema de escora representa inovação e versatilidade a construção civil ou afins, algo realmente diferenciado, devido à disposição e configuração de suas partes quando comparado a escoras de madeira que eram oferecidos até então (MIRANDA, 1998).

Figura 5 – Escora simples em tubo de aço.



Fonte: Adaptado de INPI (2021).

Na Figura 5, apresenta-se o projeto do primeiro registro de patente do sistema de escora, este processo com número MU 7502584-1 U teve data de depósito em 13/11/1995 e publicado em 05/05/1998.

2.2.2 Sistema de escora acoplada com rosca

Esta pesquisa ressaltou a existência de variados modelos e formas de escoras criadas desde então. Conforme número depositado BR 202014024431-5 U2, teve data de depósito 30/09/2014 e publicação em 26/04/2016, o sistema de acoplamento com rosca, onde a altura da escora pode ser controlada por um sistema rosca, trava e gancho, facilita a utilização, nivelamento e travamento do sistema quando o mesmo atinge o altura desejada (WEIHERMANN e WETTER, 2016).

Segundo Weihermann et. al. (2016), o sistema projetado tem larga vantagem por se tratar de um elemento totalmente acoplado e unido, evitando que ditos elementos se separem acidentalmente, reduzindo assim aos riscos de acidente. Percebe-se na Figura 6, a ilustração do modelo de acoplamento com rosca, totalmente unido.

Figura 6 – Escora metálica com dispositivo de travamento.

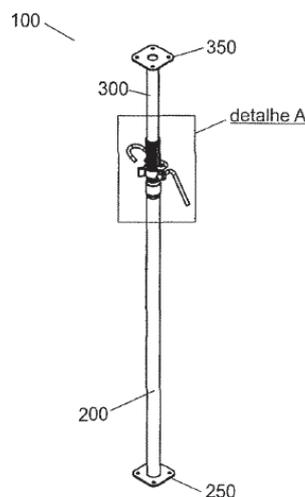


Fig. 1

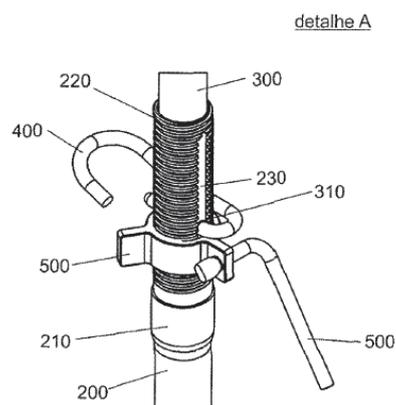


Fig. 2

Fonte: Adaptado de INPI (2021).

2.2.3 Escora para confecção de cimbres

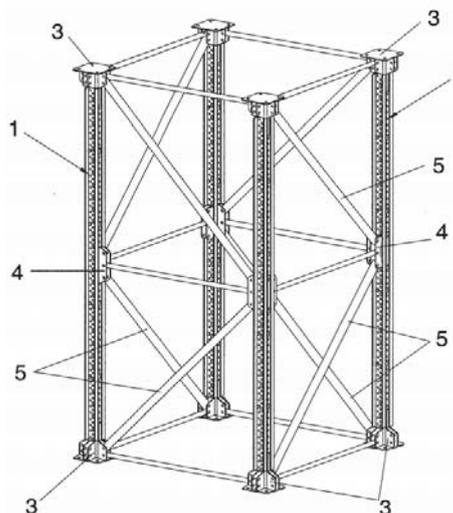
A referente patente trata-se de um sistema de montagem de barras padronizadas e acoplamento padrões, o sistema de andaime com contraventamento buscou atender uma gama ainda maior dentro da construção civil.

O documento com número de processos MU 9100548-5 U2 teve data de depósito 01/03/2011 e publicação em 21/05/2013. Segundo Aguirre (2013) o sistema de acoplamento padrão se torna muito variável, podendo assim aperfeiçoar o uso para diversas estruturas espaciais e formação de cimbres ou estruturas variadas para a construção.

O acoplamento de múltiplas escoras compreende a características geométricas que enchem de alta versatilidade formada por um número diminuído de elementos e altamente resistente, frente a distintas cargas a tolerar (AGUIRRE, 2013).

A Figura 7 contempla a formação de uma estrutura acoplada por alguns elementos padrões, apropriados em atender distintas formas, alturas e resistências. Estes elementos podem ser acoplados a novas barras padrões, a fim alcançar níveis ainda mais elevados.

Figura 7 – Escora para formação de cimbres e outras estruturas de suporte para a construção civil.



Fonte: Adaptado de Aguirre (2013).

As escoras tipo cimbres são seguras devido as plataformas de montagem se complementarem entre elas e entre as suas torres. Todas as barras padrões se complementam e formam treliças, onde as forças axiais provenientes da carga do concreto líquido, são cargas completamente distribuídas, percorrem até os nós e são dissipadas ao solo sem que haja deformação estrutural da torre cimbre (AGUIRRE, 2013). A montagem é rápida justamente, devido aos seus componentes leves e ergonômicos, além disso as torres podem ser deslocadas linearmente sem serem desmontadas.

2.3 Materiais Compósitos

Em uma visão geral, percebe-se um aumento considerável na utilização de materiais compósitos dentro da construção civil e dentro da indústria. A elevada cobrança de alta performance em equipamentos vem promovendo o desenvolvimento de novos e diversos materiais, exigindo diferentes técnicas de fabricação para uma infinidade de produtos. Segundo Falcão Bauer (2019) o emprego de materiais compósitos vem crescendo principalmente devido sua alta resistência e rigidez, aliados aos baixos custos e pesos para produção.

Os materiais compósitos são compostos pela combinação de um ou mais materiais distintos, devendo ser composto pelo primeiro denominado matriz, onde irá dar forma, unir e proteger o arranjo de diferentes materiais mais resistente, designados como reforço. Sendo assim, uma breve definição sobre materiais compósitos seria a de materiais que apresentam dois ou mais materiais quimicamente distintos. Estas características dos materiais, possibilita muitas vezes características intermediárias ou melhores do que quando analisadas separadamente (WIEBECK e HARADA, 2005).

2.3.1 Pultrusão

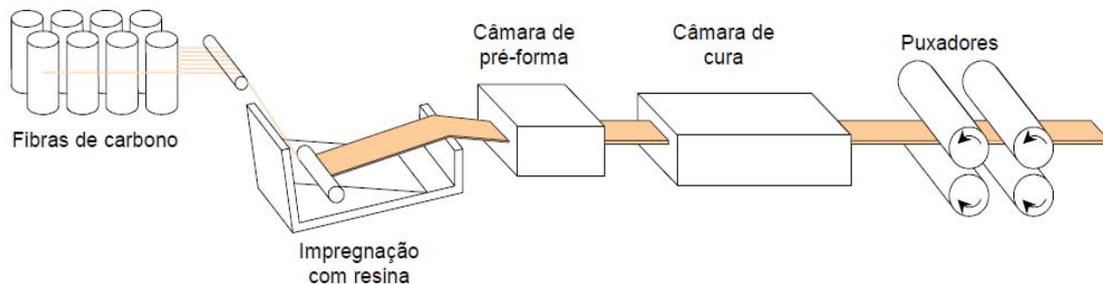
Define-se pultrusão um processo de fabricação contínua, aplicada para produção de formas de seção linear constante, como por exemplo vigas, tubos, vergalhão ou barras. Este processo de fabricação é formado normalmente por diversos carretéis e mantas de fibra. Todos

os carretéis são dispostos sobre uma bancada no qual são alinhados e desdobrados simultaneamente. Através de uma matriz é feita a junção de fios e mantas, passando por um banho de resina. Depois disso, os fios e mantas passam pela matriz, que serve para ligar as fibras dar forma e comprime o elemento. Finalmente com a fibra já em forma de perfil é executado o corte de acordo com dimensões desejadas. A pultrusão é caracterizada por puxar o perfil, diferentemente da extrusora que empurra o material.

O sistema de fabricação de perfis pultrudados pode variar conforme cada molde desejado, porém todos partem inicialmente com o mesmo processo (GALLI, 2016).

De acordo com a Figura 8, tem-se descrito o método tradicional de pultrusão combinando ações de tração e extrusão para a produção de determinado compósito. Pode-se perceber na figura a distribuição dos fios em fibra para processamento com resina e a moldagem com seção final constante laminar e linear.

Figura 8 - Representação esquemática do método de pultrusão.



Fonte: Adaptado de Galli (2016).

As fibras dispostas em carretéis são puxadas, passando pelo banho de resina, após entram no molde, passa pelo molde de cura e os pultrusores oferecem acabamento final puxando o perfil para o corte desejado.

Segundo Galli (2016), a fabricação de compósitos consiste basicamente por múltiplas camadas em fio ou lâmina que são sobrepostas, seguindo por diferentes arranjos de acordo com cada propriedade desejada. Essa abordagem de produção é indiferente, uma vez que todos os compósitos seguem o mesmo princípio.

2.3.2 Fibra de vidro

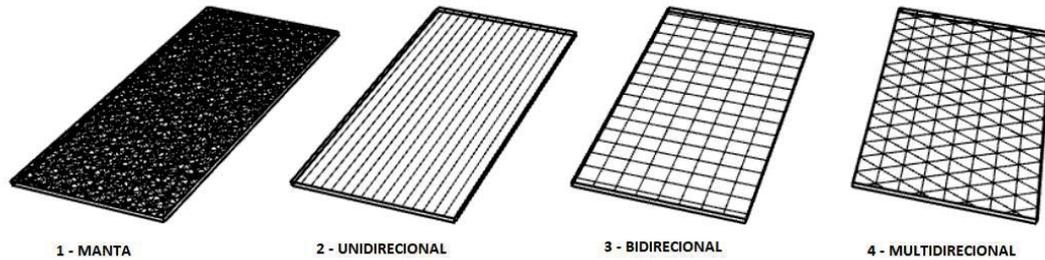
Dentre as diversas fibras sintéticas, atualmente a fibra com maior emprego tem sido a fibra de vidro. São materiais amorfo, possuindo como principais características um baixo coeficiente de expansão térmico, baixo custo, facilidade ao ser processado e excelente resistência à corrosão.

Existem quatro tipos comuns para disposição e aplicação das fibras:

- Manta: possui filamentos alinhado e agrupados linearmente, sobrepostos entre si a fim de formar uma manta;
- Unidirecional: são aplicados filamentos ou mantas lineares, permitindo elevadas resistências na direção axial das fibras;
- Bidirecional: as fibras são orientadas em direções perpendicular, formando uma malha, podendo ter variação nas propriedades mecânicas do laminado conforme a direção analisada;
- Multidirecional: as fibras são aplicadas aleatoriamente, caracterizando por apresentar as mesmas propriedades mecânicas em qualquer direção.

De acordo com a Figura 9, tem-se a representação de tipos de camadas e as direções das fibras. Para cada situação obtém-se diferentes resistências e propriedades mecânicas.

Figura 9 – Tipos de camadas de fibra.



Fonte: Adaptado de (BEBER, 2003).

A fibra de vidro possui resistência elevada, quando combinada com resinas a resistência mecânica se eleva e pode dar forma a elementos capazes de suportar cargas elevadas. Seu módulo de elasticidade pode variar de 70 a 85 GPa e sua resistência pode se aproximar entre 1000 a 3000 MPa (BEBER, 2003).

2.4 Propriedades mecânicas

Fibras são denominadas como um filamento longo linear e contínuo, com relação entre seu diâmetro e comprimento. Segundo Pierin (2005), quanto mais fina for a fibra empregada como reforço do molde, maior será a área de contato entre a fibra e a matriz, conseqüentemente, maior será a resistência do elemento.

As fibras possuem comportamento elástico até sua ruptura, não ocorrendo tensão residual e deformação plástica, diferentemente dos aços. As fibras apresentam deformação muito lenta, sendo desprezíveis em ambientes que não contem umidade.

Materiais compósitos de fibras, são capazes de suportar tensões mais elevadas do que apenas os materiais constituintes, porque as fibras interagem com a matriz, redistribuindo as cargas externas. Normalmente com a aplicação de fibras em um compósito, ocorrerá aumento significativo na resistência a tração (PIERIN, 2005).

Os perfis poliméricos pultrudados reforçados com fibra, apresentam maior resistência mecânica. Para casos de polímeros reforçados com fibra de vidro, o baixo módulo de elasticidade do material, casado com o alto índice de esbeltez do perfil, sugere fenômenos de instabilidade estrutural (PIERIN, 2005). A Tabela 2 relaciona algumas propriedades de vidros E, S e D, já a Tabela 3 são descritas as principais propriedades mecânicas das fibras. As tabelas, apresentam algumas das fibras mais utilizadas em polímeros reforçados com fibra.

Tabela 2 – Propriedades dos vidros E, S e D.

Propriedades	Vidro-E	Vidro-S	Vidro-D
Massa Específica (g/cm ³)	2,54	2,49	2,16
Resistência à Tração (GPa)	3,45	4,60	2,41
Módulo de Elasticidade (GPa)	72,4	85,5	---
Alongamento (%)	4,8	5,4	4,7
Coef. Dilatação Térmica (°C)	5,04x10 ⁻⁶	5,89x10 ⁻⁶	1,70x10 ⁻⁶

Fonte: Adaptado de (PIERIN, 2005).

Tabela 3 – Propriedades mecânicas das fibras e do aço.

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (Mpa)	Massa Específica (g/cm ³)
Vidro-E	72,40	3447,00	2,54
Vidro-S	85,50	4585,00	2,49
Aço	206,80	648,10	7,80

Fonte: Adaptado de (PIERIN, 2005).

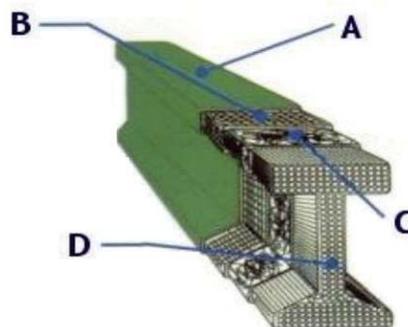
2.5 Composição de perfis PRFV

Apresentando elevada resistência e rigidez, a fibra ganha valor ao mercado por possuir baixo custo e principalmente por seus filamentos não atribuírem defeito a uma superfície. Compósitos fibrosos são a categoria de elementos mais importantes por aceitar altas forças aplicadas, já os compósitos reforçados com fibras descontínuas são inferiores por não atenderem a carregamento tão alto, quanto aos compósitos reforçados por fibra contínua.

As propriedades mecânicas dos polímeros são especificadas por parâmetros semelhantes aos dos metais, como por exemplo, módulo de elasticidade, limite de escoamento e limite de resistência à tração.

A composição de um perfil PRFV pode ser vista na Figura 10, observa-se de acordo com Pierini (2005), a representação A (resina padrão), B (véu superficial), C (manta de filamento contínuo), D (filamentos), sendo a principal função dos filamentos em fornecer resistência a tração, compressão e flexão, agrupando os maiores esforços na direção longitudinal.

Figura 10 – Composição padrão de perfis PRFV.



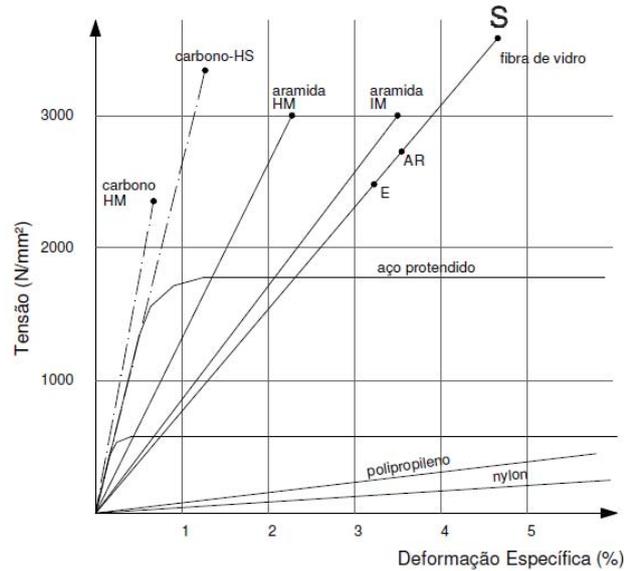
Fonte: Adaptado de Pierin (2005).

As fibras de vidro têm empregabilidade de 90% em relação a total de fibras utilizadas em resinas termofixas. Segundo Pierin (2005), as fibras possuem altas relações tensão/peso e resistência/peso, além serem resistentes a altas temperaturas, as fibras possuem notável estabilidade dimensional, resistência a corrosão e baixo custo de produção.

2.6 Curva tensão - deformação

Compósitos em fibras de vidro apresentam comportamento linear até sua fratura final, isso é muito comum na maioria dos compósitos com matrizes e fibras sintéticas. A representação do escoamento para alguns tipos de fibras de vidro tipo E, AR e S pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama tensão x deformação de fibras.



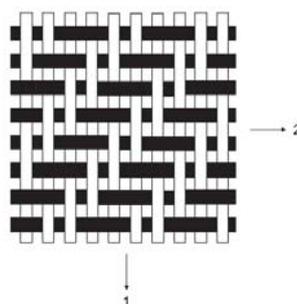
Fonte: Adaptado de (PIERIN, 2005).

Percebe-se que o material rompe, após deformação perfeitamente elástica, diferentemente dos aços. Este comportamento é igualmente obtido para diferentes tipos de fibras. Além disso, proporcionam uma ligeira deformação que se torna desprezível em ambientes secos (PIERIN, 2005).

Um aspecto importante visto a partir do gráfico da Figura 11, é o cuidado com a aplicação de forças paralelas à orientação longitudinal da fibra, pois quando aplicado a fibra de forma homogênea unidirecional, o elemento fica vulnerável a aplicações de cargas transversais ao seu sentido, fazendo com que a fibra perca suas propriedades mecânicas.

Devido aos compósitos conterem características anisotrópicas, é fundamental que os ensaios de tração sejam direcionados longitudinalmente em relação a malha de fibra (MENDES, 2018). De acordo com a Figura 12, percebe-se as direções principais das fibras 1 (Urdume) e 2 (Trama), onde deve-se posicionar corretamente a fibra, paralelo ao eixo do compósito para obter melhores resultados.

Figura 12 – Principais direções das fibras 1 (Urdume) 2 (Trama).



Fonte: Adaptado de Mendes (2018).

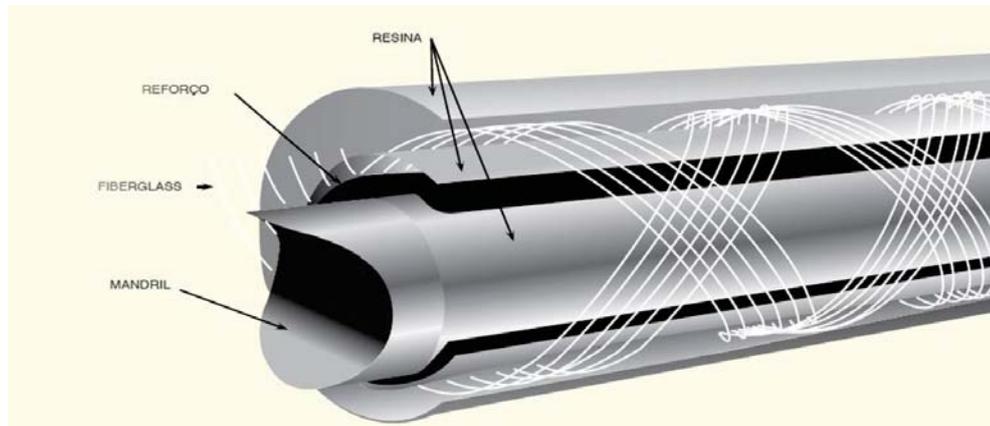
Para a execução ensaios mecânicos, o ensaio de tração é mais comum, podendo ser usado para caracterização mecânica de materiais e possibilita a determinação da resistência, módulo de elasticidade, deformações longitudinais e transversais e o coeficiente de Poisson (CALLISTER, 2016).

Tratando-se de materiais compósitos, com desempenho elástico linear, o conhecimento da ciência relacionada a suas propriedades elásticas e plásticas é fundamental. As propriedades dos materiais compósitos estão diretamente ligadas a propriedade da matriz e das fibras, ficando evidente que as suas características são cruciais para compor um elemento de qualidade e serem atrativo ao mercado (MENDONÇA, 2005).

2.7 Compósitos reforçados com fibra

É bastante comum que as forças resistência à tração encontradas na maioria dos materiais analisados são menores do que sua força teórica. Esta discrepância, acredita-se que ocorre devido a falhas e imperfeições no material. Segundo Agarwal et. al. (1990), na tentativa de minimizar falhas, aumenta-se a resistência do elemento, através de aplicações de camadas de fibras externas ao perfil. As fibras são aplicadas pelo processo chamado *filamento winding* (processo de enrolamento) conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Processo *filamento winding*.



Fonte: Adaptado de (FIBERGLASS, 1995).

A Tabela 4 apresenta o aumento de propriedades mecânicas de polímeros reforçados com fibras através do processo *filamento winding*. Estas propriedades variam conforme a espessura da fibra aplicada.

Tabela 4 - Características mecânicas de materiais reforçados com fibra de vidro pelo processo *filamento winding*.

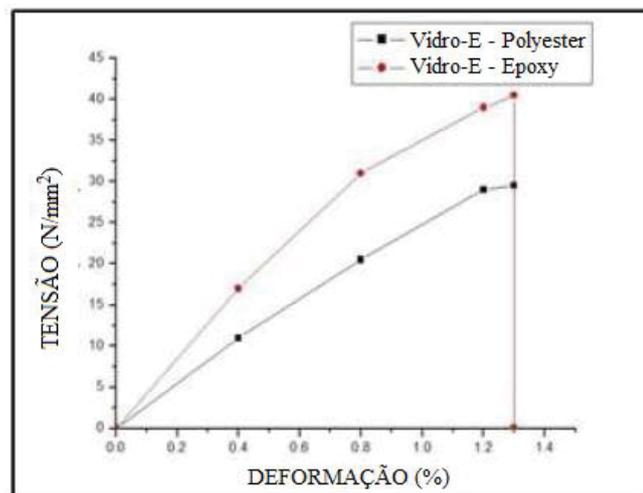
Material	Resistência à Tração (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Fibra de Aramida	3,6 - 4,1	131
Fibra de Carbono	1,5 - 4,8	228 – 724
Fibra de Vidro	3,45	72,5
Fibra de boro	3,6	400

Fonte: Adaptado de Agarwal et. al. (1990).

De acordo com Agarwal et. al. (1990), um pequeno filamento de fibra aplicado sobre um polímero frágil faz com que o material se fortifique. Em geral as superfícies que estariam suscetíveis a falha, quando aplicado uma camada superficial de fibras, automaticamente ocorre um aumento considerável de resistência à tração devido a esta aplicação.

A Figura 14 mostra a curva tensão de tração x deformação, para fibra de vidro-E com impregnação de distintas resinas.

Figura 14 – Gráfico tensão de tração x deformação de polímeros reforçados com fibra de vidro-E.



Fonte: (RESEARCHGATE, 2008).

A curva mostrada na Figura 15 demonstra os valores agregados a fibra de vidro e a fibra de carbono para o ensaio de tensão de flexão x deformação.

Figura 15 – Comparativo tensão de flexão x deformação para fibras de vidro e carbono.



Fonte: (GALLI, 2016).

Há uma grande diferença de tensão de flexão, quando se compara fibras de vidro com fibras de carbono, mas elas acabam se assemelhando quanto as suas propriedades mecânicas.

2.8 Normas Técnicas

A utilização de normas de segurança tem o propósito de regulamentar produtos e serviços visando a segurança, integridade, acessibilidade e qualidade de vida aos usuários. De acordo com a ABNT (1997) as normas são consideradas uma referência há um mercado específico, sendo usadas em processos de regulamentação, de acreditação, certificação, informação técnica e nas relações comerciais cliente x fornecedor.

O Brasil possui normas específicas para cada segmento, desde normas para escoramento de concreto até para fabricação de perfis pultrudados por exemplo.

Para o desenvolvimento da escora, pretende-se embasar pelas normas que prescrevem materiais a serem utilizados, metodologia de projeto e execução. Foram empregadas algumas normas referentes a construção, segurança e estabilidade, pelo fato de que o projeto da escora possui semelhança as escoras de aço.

As Normas Técnicas utilizadas como referência para o desenvolvimento deste trabalho são:

- ABNT NBR 15696: 2009 – Formas e escoramentos para estruturas de concreto – Projeto, dimensionamento e procedimento executivo.
- ABNT NBR 15708-5: 2011 – Parte 5: Indústrias do petróleo e gás natural – Perfis pultrudados e perfis estruturais.
- ABNT NBR 8800: 2008 – Parte 5: Condições específicas para o dimensionamento de elementos de aço.
- ABNT NBR 6120: 2019 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.
- ABNT NBR 5580: 2002 – (Antiga DIN 2440) Tubos de aço-carbono para usos comuns na condução de fluidos – Requisitos e ensaios.

Contudo, a breve revisão bibliográfica se descreve conceitos, objetivos e aplicação de escoras apresentadas, com finalidade em fundamentar as escolhas de materiais, para realização de análises numéricas do novo modelo de escora PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro). Por meio do embasamento teórico, busca-se desenvolver um modelo numérico da escora, atendendo as normas de segurança e confiabilidade.

A criação de novas tecnologias vem sendo implantada e aprimorada constantemente dentro da construção civil, sob criação de equipamentos ou sistemas de proteção, tecnologias BIM, entre outros (CICS, 2019). Desta forma, o desenvolvimento a seguir de uma escora PRFV busca atender condições de inovação, cumprindo requisitos de engenharia necessários para aplicação real do produto.

3 METODOLOGIA

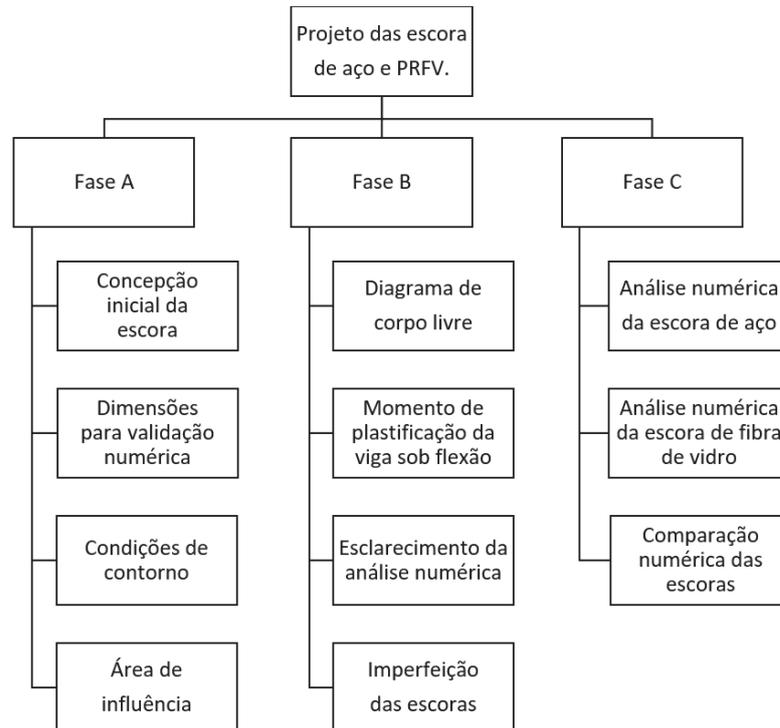
Para o desenvolvimento do projeto da escora PRFV, serão utilizadas três fases:

- Planejar e esclarecer o produto;
- Conceber e projetar;
- Analisar numericamente;

A partir destas fases, procura-se a determinação mais adequada para o modelamento do projeto, atendendo aos requisitos iniciais sobre conceitos, até a aplicação de conhecimentos específicos.

A sequência de desenvolvimento do projeto tem como base a demonstração total do processo a ser executado, notando que todos os passos propostos representados na Figura 16 seguem um fluxograma a ser cumprido e descrito no decorrer deste trabalho.

Figura 16 - Etapas para desenvolvimento do projeto.



Fonte: O Autor (2021).

Por se tratar de um projeto de análise e comparação de resultados, a concepção do projeto foi simplificada. Através do fluxograma, foram empregadas três fases para o processamento e análise da escora, tornando-se um formato dinâmico e de fácil entendimento.

3.1 Projeto do sistema da escora

Esta seção apresenta o procedimento utilizado para o desenvolvimento proposto pelo projeto, bem como seus materiais e métodos utilizados, em paralelo com a análise do atendimento dos objetivos específicos determinados. Tratando-se de um projeto distribuído sob três fases de trabalho, pretende-se realizar a construção de um modelo numérico, a fim de analisar e testar a escora sob aplicação de diferentes cargas. Desta forma, obtêm-se maiores critérios de segurança, para a utilização e aplicação da escora.

Procurando atender os critérios específicos, a escora a ser desenvolvida irá servir para absorção de cargas provisórias provenientes do concreto líquido aplicado sobre lajes, vigas ou afins até sua cura. Com o conhecimento aprofundado sobre as principais propriedades mecânicas relacionadas a fibras, busca-se definir o perfil mais apropriado confeccionado através de métodos de pultrusão ou *filamento winding*.

A estrutura da escora será projetada em tubo PRFV e comparada a escora de aço. A escora deve conter sistema de rosca para nivelamento, trava de segurança, e deve ter acoplamento de tubos com trava de segurança para que o sistema reduza de tamanho quando estiver em desuso. O projeto deve atender a norma ABNT NBR 15708-5 (2011), referente a estrutura de perfis PRFV e normas relacionadas a dimensionamentos estabilidade e segurança.

3.2 Características específicas para utilização de escoras

De acordo com cada fabricante, as escoras devem atender a diversos critérios de utilização, transporte e estocagem. Estes critérios serão aplicados igualmente para a escora em

fibra de vidro. Segundo Weihermann et. al. (2016), os principais critérios para aumentar a vida útil de uma escora devem ser seguidos rigorosamente:

- O projeto de escoramento e determinação adequada de cada escora e acessório deve ser feito apenas por profissional certificado e com conhecimento técnico na área;
- É fundamental que o projeto indique o alinhamento e distribuição para que ocorra a aplicação de carga uniforme sobre as escoras, sendo de responsabilidade do engenheiro esta determinação;
- Deve-se inspecionar todas as escoras antes e durante a concretagem evitando qualquer incidente;
- Todas as escoras devem ser travadas entre si, assegurando totalmente que a carga de compressão seja apenas axial;
- O descarregamento do concreto líquido, deve ser feito uniformemente, evitando cargas pontuais sobre uma escora;
- Após a cura do concreto, as escoras devem ser removidas uniformemente, ou seja, deve-se iniciar a remoção por uma lateral da edificação, fazendo com que a carga seja absorvida pelo concreto seco instantaneamente;
- A área de influência de carregamento deve ser ajustada conforme norma ABNT NBR 8800: 2008;
- A sobrecarga de trabalho deve ser considerada conforme a norma ABNT NBR 15696: 2009, sendo como mínimo 2 kN/m^2 , sendo que a carga estática total, não pode ser inferior a 4 kN/m^2 ;
- Pressões de vento são conforme ABNT NBR 6123, tendo que ser considerado como mínimo $0,6 \text{ kN/m}^2$.

3.3 Propriedades mecânicas

A partir das propriedades mecânicas descritas na Tabela 5, pretende-se modelar numericamente no *software Mastan* a escora de aço e posteriormente a escora PRFV, para avaliar o comportamento de ambas, efetuando uma comparação de colapso entre as escoras.

Tabela 5 – propriedades mecânicas dos elementos

Propriedades mecânicas dos elementos utilizados				
Aço	Limite de escoamento (MPa)	Coefficiente de Poisson	Resistência a Tração (Mpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)
ASTM A36	250	0,3	400 a 550	200
Fibra Vidro	-	0,3	3450	72,5

Fonte: O Autor (2021).

Desta forma, o presente capítulo apresentou a metodologia que será utilizada para efetuar o desenvolvimento do projeto da escora PRFV e a escora de aço. Foram apresentados os itens necessários para desenvolver o projeto e os materiais utilizados para a construção numérica, bem como os métodos que serão utilizados para validação do sistema.

3.4 Fase A

Na Fase A, demonstra-se que a escora de fibra de vidro deve atender aos mesmos critérios estabelecidos para a escora metálica, sem que haja deformações ou quaisquer imperfeições que

podem dar instabilidade na estrutura a ser concretada. Esta fase tem como finalidade demonstrar o levantamento das cargas na aplicação pretendida.

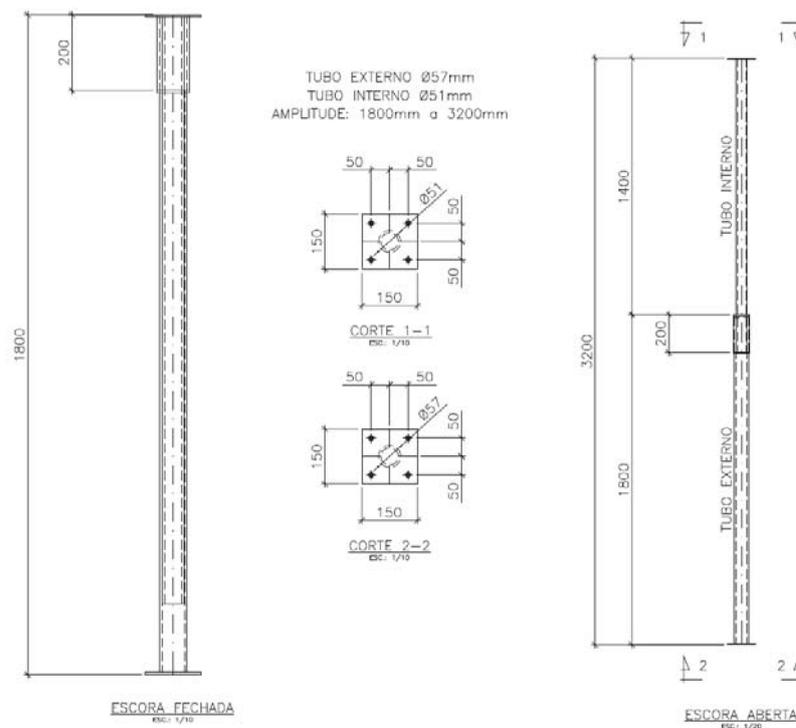
3.4.1 Concepção inicial da escora

A proposta de projeto tem como principal finalidade projetar um dispositivo de escora PRFV em material compósito a base de fibra de vidro, capaz de suportar cargas provenientes da concretagem de vigas e lajes de concreto até que ocorra a cura. A escora a ser modelada deve atender critérios de cargas específicas para determinada altura de pé direito, garantindo segurança, estabilidade e maior vida útil do sistema.

A Figura 17 mostra a concepção inicial do projeto onde pretende-se comparar a escora PRFV com uma escora de aço com o mesmo dimensional e solicitações exigidas pela escora metálica. A análise dimensional será restrita conforme o modelo de escora em aço, onde a altura máxima de pé direito será de 3200mm para apoio de lajes ou vigas de concreto.

Como pode-se visualizar na Figura 17, os flanges de topo (representados pelos cortes 1-1 e 2-2), têm como finalidade a fixação da escora em sua base e topo para manter a estrutura engastada.

Figura 17 – Principais medidas do sistema de escora.



Fonte: O Autor (2021).

3.4.2 Dimensões para validação numérica

Para validação numérica, pretende-se primeiramente modelar uma escora de aço com as seguintes limitações:

- Tamanho - 3,2m x 1,8m
- Capacidade máxima de carga – 1300Kg
- Espessura 1,9mm
- Tubo – 51mm
- Peso aproximado – 8,75Kg

A partir da verificação numérica efetuada para a escora de aço, avalia-se a mesma simulação para a escora de fibra de vidro. Pretende-se utilizar um tubo com as mesmas dimensões, porém com as características mecânicas da fibra de vidro, a fim de comparar se a escora de fibra irá suportar as cargas e deslocamentos já autenticados para a escora de aço.

3.4.3 Condições de contorno

- Espessura da laje: 200mm;
- Dimensões da laje 5m x 4m;
- Quatro linhas de vigota secundárias.

Será considerada uma laje para concretagem descrita com dimensões de 5m x 4m x 0,2m. As condições de contorno são aplicadas igualmente para quaisquer dimensões de laje, sob aplicação de orientações específicas em norma. Através das orientações normativas aplica-se as cargas sobre a laje conforme Tabela 6.

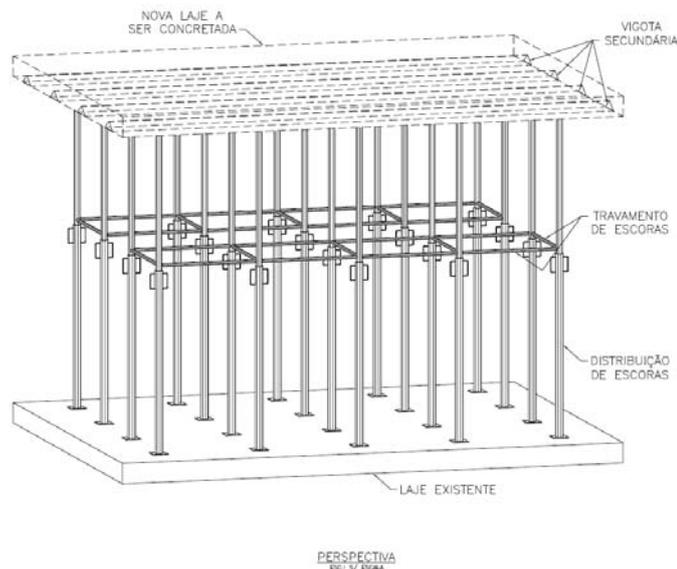
Tabela 6 – Condições de contorno.

Item de influência	Peso	Total
Peso próprio da estrutura	$2500\text{Kgf/m}^3 \times 0,2\text{m}: 500\text{ Kgf/m}^2 \times 1,66\text{ m}^2$	830 Kgf
Peso próprio do compensado	$6\text{ Kgf/m}^2 \times 1,66\text{ m}^2$	10 Kgf
Peso próprio da viga secundária	$10\text{ Kgf/m}^2 \times 1,66\text{ m}^2$	17 Kgf
Sobrecarga de montagem	$200\text{ Kgf/m}^2 \times 1,66\text{ m}^2$	332 Kgf
Total		1189 Kgf

Fonte: O Autor (2021).

Para que as cargas da concretagem se distribuam uniformemente e perfeitamente axial ao eixo da escora, deve-se garantir que a distribuição, o alinhamento e travamento das escoras tenham sido executados conforme demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Perspectiva com distribuição uniforme das escoras.



Fonte: O Autor (2021).

As escoras não podem ser consideradas elementos estruturais perfeitamente retos e a carga também não é aplicada de forma perfeitamente centrada, desta forma haverá um efeito de

flexão nas escoras (NBR 8800, 2008). Este efeito é bastante influenciado pelas imperfeições geométricas iniciais. Este critério é previsto em norma e deve-se considerar também quando submetido a uma análise numérica.

A distribuição das escoras deve ser feita de maneira uniforme onde a distância entre elas pode variar conforme as condições de contorno.

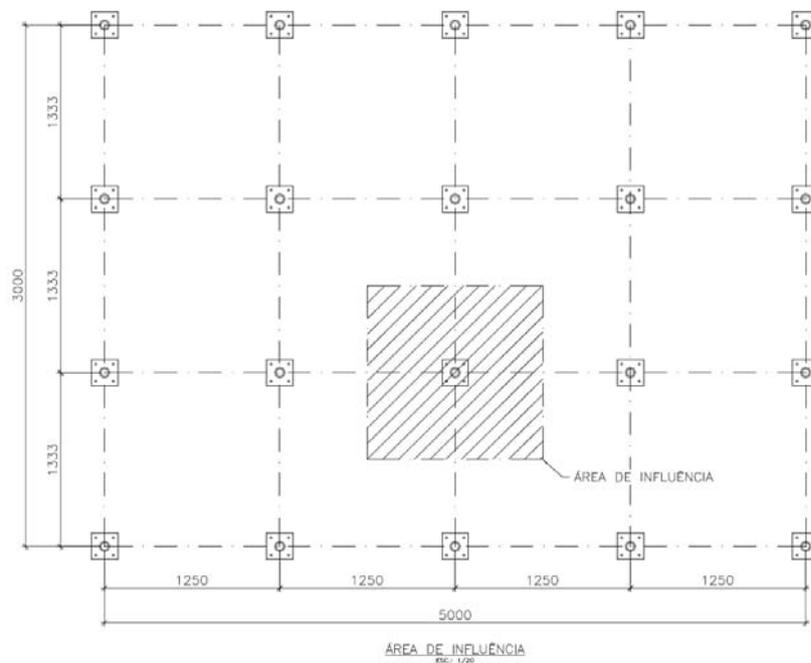
3.4.4 Área de influência

A área de influência é a área da laje cujo carregamento está apoiado sobre determinada escora. Este valor é obtido pela distância entre dois apoios, sendo que cada metade da laje influencia determinada escora. Esta área é de fundamental conhecimento para que as cargas sejam igualmente distribuídas e para que não ocorra deformação na laje ou viga que deseja-se obter.

$$\begin{aligned}
 A_x &= 1250\text{mm}/2 & A_y &= 1333\text{mm}/2 \\
 A_x &= 625\text{mm} & A_y &= 666,5\text{mm} \\
 A_{total} &= A_x \times A_y \\
 A_{total} &= 625\text{mm} \times 666,5\text{mm} \\
 A_{total} &= 416.562,5\text{mm}^2
 \end{aligned}$$

A Figura 19 demonstra a área de influência aplicada sobre uma escora. Desta forma, percebe-se que as escoras internas abrangem uma área de influência maior, neste caso a equivalência de $416.562,5\text{mm}^2$.

Figura 19 – Área de influência.



Fonte: O Autor (2021).

3.5 Fase B

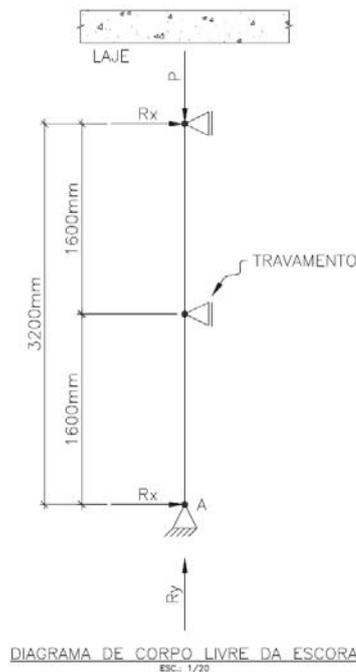
Durante a fase B busca-se definir a concepção estrutural das escoras, seus principais carregamento, reações e restrições de movimento, mostrando os critérios que deve-se prever para a execução do modelo numérico.

3.5.1 Diagrama de corpo livre

Esta etapa tem como objetivo realizar uma análise estrutural do projeto, aplicando o conceito de dimensionamento estrutural. Será utilizado como ferramenta auxiliar o *software* de cálculo estrutural *Mastan*.

A Figura 20 representa o diagrama de corpo livre de um perfil genérico em tubo, simulando o modelo de uma escora para o estudo numérico, com as restrições de movimento conforme sua aplicação.

Figura 20 – Diagrama de corpo livre.



Fonte: O Autor (2021).

3.6 Critério de falha por plastificação para barras flexo comprimidas

O *software Mastan* considera que o critério de falha para barras de aço submetidas à flexo-compressão é quando ocorre a plastificação completa da seção a ponto de as tensões (e os esforços internos) não poderem mais aumentar. Este fenômeno pode ser calculado conforme a Equação 3 e mostrado na curva de interação da Figura 21(a).

$$\left(\frac{N}{N_Y}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_P}\right)^2 + 3,5 \left(\frac{N}{N_Y}\right)^2 \cdot \left(\frac{M}{M_P}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

Onde:

N_Y : Carga axial de plastificação da seção;

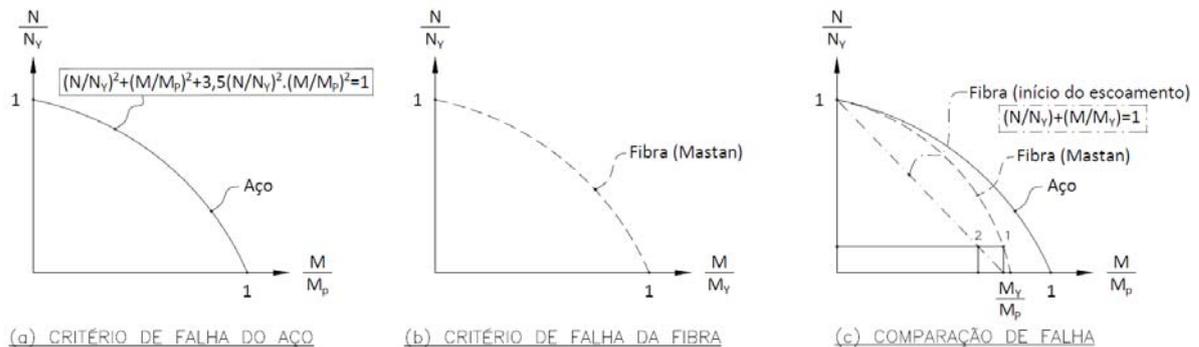
M_P : Momento de plastificação da seção.

Como se pode visualizar na Figura 21, para barras de aço a falha por plastificação de uma coluna comprimida só ocorrerá quando $N/N_Y = 1$. A falha por plastificação de uma coluna fletida só ocorrerá quando $M/M_P = 1$. E a falha por plastificação de uma coluna flexo-comprimida só ocorrerá quando a Equação (1) for igual a 1 (para qualquer combinação de N e M solicitantes) (a). Para a escora de fibra, a comparação de falha ocorre da mesma forma que o *Mastan* utiliza para a escora de aço (b), por sua vez com a alteração do M_P por M_Y , devido a não resistência da escora de fibra no regime plástico. Em outras palavras, considera-se que uma viga de fibra somente fletida falha quando se atinge o escoamento nas fibras externas. Pode-se

visualizar a comparação das curvas (c) representando que a falha ocorre no início do escoamento e não pela plastificação da seção.

Mesmo que se esteja considerando que as vigas fletidas de fibra falhem quando as tensões nas fibras externas da viga atingem o escoamento, para uma barra de fibra flexo-comprimida, a falha devida à combinação de N e M continua obedecendo a Equação (1) da curva de interação do aço (que é uma curva calibrada a partir de ensaios de perfis estruturais de aço), o que pode não corresponder à realidade.

Figura 21 – Critério de falha por plastificação para barras flexo-comprimidas



Fonte: Adaptado de (MACGUIRE, GAKKHER e ZIEMIAN, 2014).

A curva que corresponde ao início do escoamento dada pela resistência dos materiais, é uma reta, representada pela Equação 2 (curva vermelha da Figura 21(c)).

$$\left(\frac{N}{N_Y}\right) + \left(\frac{M}{M_p}\right) = 1 \quad (2)$$

Onde:

N_Y : Carga axial de plastificação da seção;

M_Y : Momento de plastificação da seção.

Esta reta estabelece uma região de segurança menor. Porém como no *Mastan* acaba sendo obrigatório considerar a Equação 1 para aço, vai estar considerando a curva verde (e não vermelha como deveria ser), o que vai um pouco contra a segurança.

3.6.1 Momento de plastificação de uma viga sob flexão

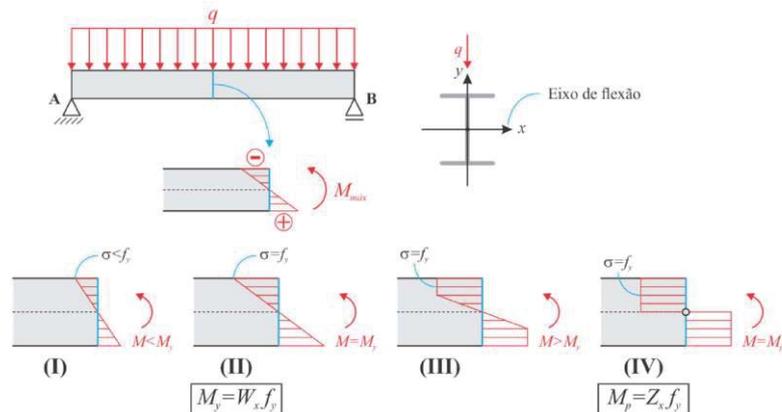
O discernimento de leitura efetuado pelo *software Mastan* é conforme os critérios do modelo elastoplástico perfeito para o material. Uma seção analisada se comporta de maneira elástica até que se atinjam os esforços (momento e normal) que a plastifiquem inteiramente e formem repentinamente uma rótula plástica, ou seja, não há escoamento gradual.

Analisando a Figura 22, onde uma seção qualquer está submetida à flexão, o colapso pode acontecer por plastificação (que ocorre depois que os deslocamentos provocados pela flambagem aumentam muito). A análise dimensional adotada pelo *software Mastan* considera que o material se comporta de forma elástica até que se atinja o momento de plastificação $M_p = Z \cdot f_y$.

Como um aumento gradual do carregamento, ocorre então o escoamento nas fibras externas da seção transversal, este fenômeno é então chamado momento de escoamento M_Y (II). Desprezando o encruamento do aço e ampliando ainda mais o carregamento, toda a seção começa a plastificar e o momento fletor desenvolvido na seção é ainda maior que M_Y (III). Sendo assim, ocorre o colapso efetivo, onde toda a seção do material já plastificou e forma-se uma rótula plástica (IV).

No *software Mastan*, a rigidez da estrutura só muda quando se atinge o estágio (IV) conforme se verifica a condição da Equação (1). Em outras palavras, o escoamento gradual da seção é desprezado.

Figura 22 – Comportamento de tensões de flexão até o colapso plástico para aços.



Fonte: O Autor (2021).

A partir da rótula plástica a seção não oferece mais quaisquer tipos de rigidez à flexão neste ponto, resultando assim o colapso plástico ou momento plástico M_p .

Como o *software Mastan* considera a formação da rótula plástica quando o momento atinge $M_p = Z * f_y$, trocando Z por W , a falha acaba sendo considerada como no início do escoamento. Isso só é possível porque o *Mastan* não considera o escoamento gradual dos estágios II e III da Figura 22.

Por se tratar de uma comparação entre dois perfis de seção transversal igual, tanto para a escora de aço quanto para escora de fibra, se aplica no *software Mastan* uma estratégia de alteração do módulo de elasticidade e a tensão de escoamento para cada elemento.

Para o tubo de fibra se estabelece um novo critério de falha, onde o módulo plástico da seção se iguala ao módulo elástico, ou seja, a falha ocorre quando atinge a tensão de escoamento das fibras externas do material, estágio (II) da Figura 22.

Visualizando na Figura 22, considerando uma coluna puramente fletida, o artifício de falha para o perfil PRFV acontece quando atinge o limite de proporcionalidade, sendo assim a falha na seção ocorre quando inicia o escoamento, estágio (II) e não ocorre a plastificação completa da seção conforme a escora de aço, estágio (IV). Entretanto, o critério de falha por plastificação da escora de fibra flexo-comprimida continua seguindo a equação de interação empírica do aço, Equação (1).

3.6.2 Esclarecimento da análise numérica

Para se obter uma análise numérica até o colapso, deve-se inserir uma imperfeição na coluna a ser analisada, esta imperfeição é o que ocorre na prática, quando as escoras têm um pequeno desalinhamento em relação ao seu eixo vertical.

Para perfis estruturais de aço, segundo a Norma (NBR 8800, 2008) e (GALAMBOS, 1998), a amplitude de imperfeição geométrica normalmente considerada para a modelagem numérica e para definição de curvas de resistência é de $L/1000$ até $L/500$. Para a análise das escoras de fibra de vidro, mantêm-se o mesmo critério utilizado na escora de aço.

Considerando a imperfeição lateral para colunas comprimidas, se adotam dois critérios admissíveis de deformação da coluna sendo $L/500$ e $L/1000$.

Desta forma, obtém-se os valores para a aplicação da deformação lateral equivalente a deformação axial que ocorre na prática.

Para a validação numérica das escoras, se assume a seguinte deformação:

$$\Delta=L/500$$

Sendo:

L= comprimento da escora

Δ = deformação da escora

$$\Delta= 3200\text{mm}/500$$

$$\Delta= 6,4\text{mm}$$

$$\Delta=L/1000$$

Sendo:

L= comprimento da escora

Δ = deformação da escora

$$\Delta= 3200\text{mm}/1000$$

$$\Delta= 3,2\text{mm}$$

Sendo assim, têm-se os valores de 6,4mm e 3,2mm para considerar como imperfeição da escora, isso faz com que a análise numérica se aproxime da imperfeição axial que ocorre na prática.

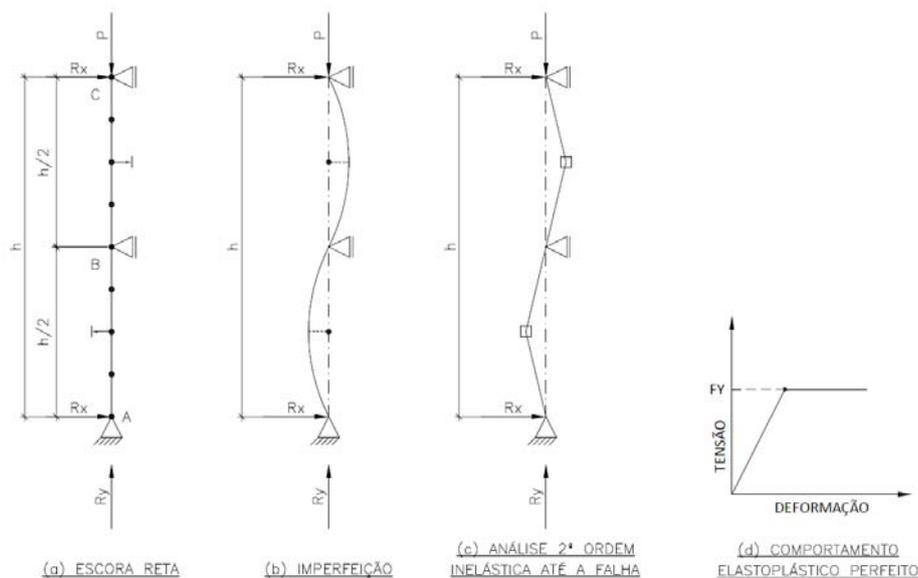
3.7 Fase C

A fase C apresentará a modelagem numérica utilizando análises não lineares e imperfeições geométricas. Pode-se ver os principais pontos de carregamento, deslocamentos, reações apoios e simulações para aplicação e análise numérica no *software Mastan*.

3.7.1 Imperfeição da escora

Pode-se visualizar na Figura 23, inicialmente a escora reta, com a aplicação das cargas e restrições de movimento. Posteriormente pode-se visualizar a deformação aplicada sobre a coluna e finalmente pode-se verificar o instante que ocorre a falha na barra. Esta imperfeição forçada simula o que ocorre na prática, para análise de colapso. Pode-se ver também, o gráfico do comportamento de tensão – deformação, para seção de perfis com comportamento elastoelástico perfeito. Estes dados são utilizados para simular a imperfeição de cargas axiais aplicadas sobre colunas.

Figura 23 – Escora reta – deformada – falha.



Fonte: O Autor (2021).

Com finalidade em encontrar o limite de ruptura de cada material, aplica-se uma carga genérica que ultrapasse os limites de escoamento. Desta forma encontra-se o valor limite da carga quando irá ocorrer a rótula plástica.

4 RESULTADOS

Neste capítulo estão descritas as etapas do projeto realizadas para o desenvolvimento das escoras. Conforme descrito no fluxograma exposto no capítulo de metodologia, as primeiras etapas esclarecem o funcionamento e aplicação da escora para apoio de lajes fabricadas em concreto líquido.

4.1 Fase D

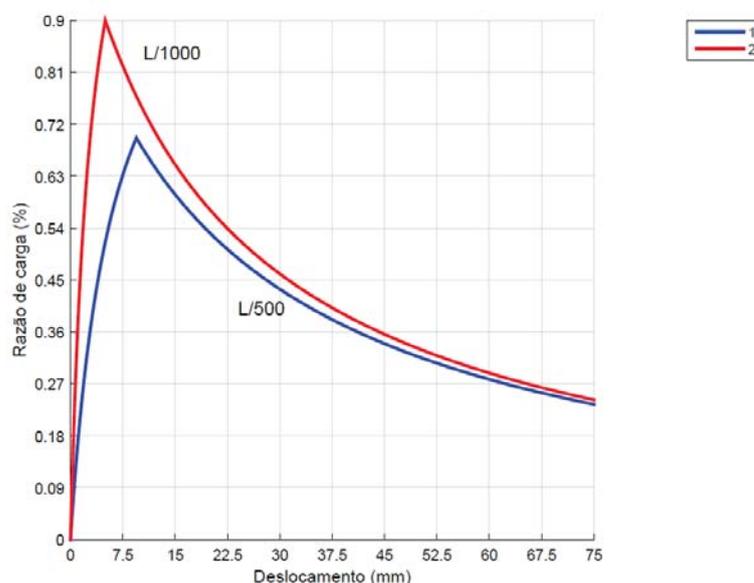
Durante esta fase, serão apresentados os resultados e a comparação de resultados através das curvas de colapso obtido pelo *software Mastan*. Sobrepondo as curvas obtidas, pretende-se comparar a escora de aço e a escora PRFV para validação do experimento.

4.1.1 Análise numérica da escora de aço

Para a validação do limite de escoamento da escora de aço, aplica-se uma carga axial de 150 KN sobre a escora metálica, com intenção de se obter a carga de plastificação da mesma. Busca-se encontrar o percentual de carga, através de uma análise de segunda ordem inelástica onde irá ocorrer a falha.

A Figura 24 mostra as curvas de deformação da escora de aço até o seu colapso. Foram utilizados dois critérios de imperfeição geométrica da escora sendo $L/1000$ (curva 1) e $L/500$ (curva 2). Neste caso, as cargas máximas suportadas para a escora de aço até atingir a falha foram de 135,0 KN e 104,45 KN respectivamente.

Figura 24 – Curva de Deslocamento (mm) x razão de carga (%)



Fonte: O Autor (2021).

Como se pode visualizar na Figura 24, para curva 1 tem-se um deslocamento lateral de aproximadamente 5,0 mm e a rótula plástica ocorre com cerca de 90,0 % da carga aplicada. Já para a curva 2, percebe-se um aumento no deslocamento lateral (aproximadamente 9,4 mm) e uma diminuição da carga resistente (cerca de 69,60 % da carga aplicada). O ponto limite das curvas corresponde a plastificação completa da seção e instabilização da estrutura.

4.1.2 Análise numérica da escora de fibra de vidro

Para a comparação do limite de escoamento da escora de fibra de vidro, aplica-se a mesma carga axial de 150 KN sobre a escora de fibra, com intenção de se obter a carga de colapso.

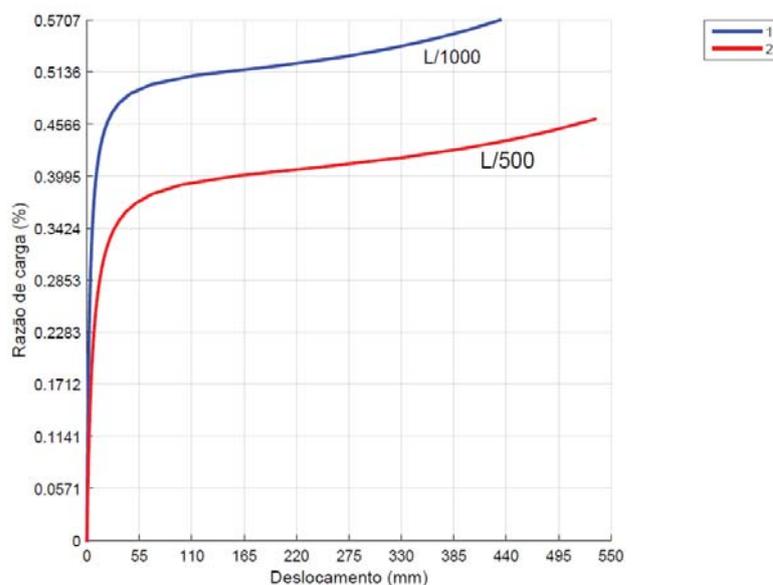
Busca-se encontrar o percentual de carga, através de uma análise de segunda ordem inelástica onde irá ocorrer a falha. Para análise numérica da escora PRFV se faz necessário igualar o módulo plástico ao módulo elástico nas propriedades do perfil.

Através desta consideração de projeto, onde se igualam os módulos plástico e elástico do material, o *Mastan* entende que a rótula plástica se forma em um momento $M = W \cdot f_y$, o que na prática representa o início do escoamento da seção.

Devido à fibra de vidro não absorver carga no regime plástico, atribui-se a falha para a escora PRFV quando o material atingir o escoamento das fibras externas da seção sob flexão.

A Figura 25 mostra os percentuais de carga que as escoras PRFV são capazes de suportar e seu máximo deslocamento antes que ocorra a falha. Foram utilizados dois critérios de imperfeição geométrica, sendo $L/1000$ (curva 1) e $L/500$ (curva 2). Neste caso, a cargas máximas suportadas para a escora PRFV até atingir a falha foi de 85,65 KN e 69,3 KN respectivamente.

Figura 25 – Curva de Deformação (mm) x razão de carga (%).



Fonte: O Autor (2021).

Como pode visualizar-se na Figura 25 para curva 1 tem-se um deslocamento lateral de aproximadamente 433,5 mm e a rótula plástica ocorre com cerca de 57,1 % da carga aplicada. Já para a curva 2, percebe-se um aumento no deslocamento lateral (aproximadamente 533,3 mm) e uma diminuição da carga resistente (cerca de 46,22 % da carga aplicada). Portanto, o deslocamento lateral para a aplicação da escora PRFV não valida o experimento, uma vez que deve-se manter um limite lateral para que não haja instabilidade na estrutura que deseja-se concretar. Isso provocaria um grande deslocamento vertical da viga ou laje de concreto.

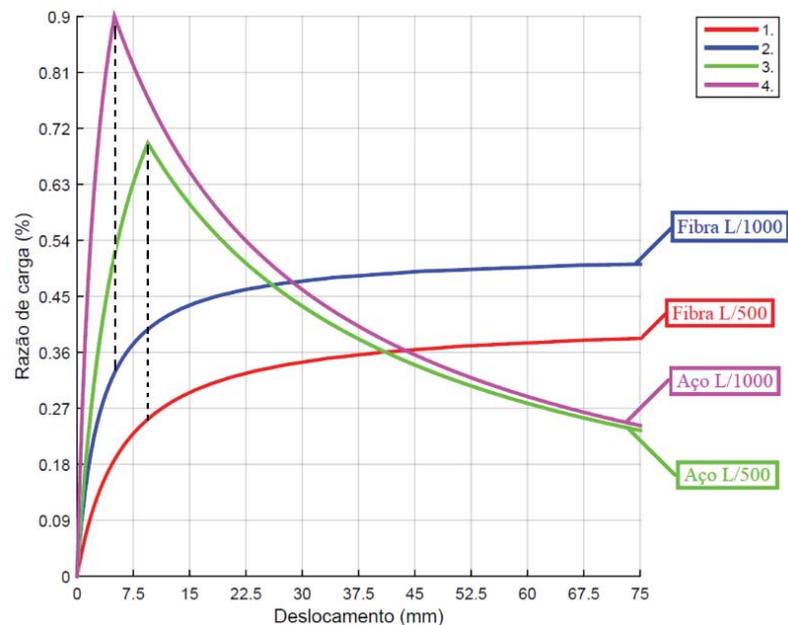
O comportamento altamente não linear das curvas 1 e 2 se deve à consideração de uma análise não linear geométrica, onde a geometria é atualizada e a carga de compressão cada vez contribui mais para a flexão, além do baixo módulo de elasticidade da fibra associado a uma alta resistência à tração.

4.1.3 Comparação das escoras de aço e fibra.

Como pode visualizar-se na Figura 26 foram plotadas as curvas de colapso para as escoras de aço e fibra. Para ambas as escoras foram feitas as análises de colapso com diferentes imperfeições geométrica iniciais e se obtiveram diferentes resultados. As “curvas 1 e 2” representam a escora de aço e as “curva 3 e 4” representa a escora de fibra. Há uma grande diferença quanto ao limite de escoamento e também quanto à deformação de cada modelo de escora. Devido à baixa deformação lateral, as escoras de aço têm uma grande vantagem em sua aplicação.

Esta validação afirma que a escora de fibra de vidro tem uma boa resistência de carga axial, porém quando se utiliza a escora de fibra com a mesma seção que a escora de aço tem-se uma deformação lateral demasiadamente grande, fazendo com que inviabilize a sua utilização. Uma possível solução seria usar uma seção com maior rigidez (maior momento de inércia).

Figura 26 – Comparação das curvas até o colapso para escora de aço e PRFV



Fonte: O Autor (2021).

Admitindo como critério admissível de deslocamento lateral das escoras de aço no momento do colapso, a carga resistente das escoras de fibra seria ainda menor. Como pode visualizar-se na Figura 26 ambas as escoras com imperfeição geométrica $L/1000$ e $L/500$, tem uma grande diminuição na carga resistente chegando a 32,75% e 24,75% respectivamente.

Verifica-se que as escoras de fibra têm também grande deslocamento vertical no momento do colapso (Figura 27). Portanto, pode-se estabelecer um critério de deslocamento vertical da laje de concreto para achar o ponto correspondente a carga limite da escora. Em outras palavras, a escora de fibra é governada pelos deslocamentos e não pela carga de colapso plástico.

O fato de ter sido considerada a curva verde de interação para início de escoamento (Figura 21 (c)), e não a vermelha, não invalida as análises aqui realizadas. Como a carga limite de uma escora de fibra será limitada pelo deslocamento (lateral ou vertical da laje), não é necessário obter com precisão a carga de colapso plástico.

Para um mesmo valor de N (carga axial aplicada), o momento M que provoca a falha está dado pelo ponto 1 para a curva considerada no Mastan (verde), quando deveria ser o ponto 2 da curva vermelha), o que vai levemente contra a segurança.

A Figura 27 representa as deformações geométricas das escoras e as deformações e deslocamentos devido a carga aplicada até atingir o percentual de colapso para cada escora. Verificou-se que a inviabilidade da escora de fibra se deve aos grandes deslocamentos laterais, muito antes de se chegar ao colapso, o que valida as análises.

Figura 27 – Deformação geométrica das escoras



Fonte: O Autor (2021).

Uma possível adequação para que a escora PRFV possa absorver mais carga sem que deforme demasiadamente, seria aumentar o diâmetro do tubo e também aumentar a espessura da parede do tubo, contudo isso pode inviabilizar o produto se hipoteticamente não for feito um levantamento sobre sua viabilidade técnica e financeira para fabricação do produto.

5 CONCLUSÕES

O presente capítulo tem o objetivo de apresentar detalhadamente o atendimento ao objetivo geral e os objetivos específicos no decorrer do desenvolvimento do presente trabalho.

- O objetivo geral de desenvolver o projeto de uma escora PRFV, direcionado à construção civil para apoio de vigas ou lajes de concreto, foi atendido integralmente tendo como validação os testes apresentados acima.
- A pesquisa por escoras utilizadas dentro da construção de edificação, disponíveis no mercado foi realizada a fim de aprofundar o conhecimento referente ao sistema de escora, possibilitando conhecer seus modelos, configurações e funcionalidade. Esta etapa auxiliou também para a concepções do projeto da escora PRFV;
- O estudo sobre as propriedades mecânicas e características técnicas dos elementos construtivos em fibras de carbono e fibras de vidro apresentadas no presente trabalho possibilitaram a realização da análise estrutural da escora a ser confeccionada;
- A realização de pesquisas por patentes relacionadas a escoras possibilitou a análise e escolha do sistema que melhor atende aos requisitos do projeto, tendo como principal diferencial a redução de peso e o acoplamento do sistema de rosca para nivelamento.
- Através da conclusão de todas as etapas de desenvolvimento e análise, se fez possível um melhor entendimento sobre as características mecânicas relacionadas a tubos PRFV, mostrando assim a importância sobre os conceitos e aplicação da análise dimensional numérica.

Com a realização do presente trabalho foi possível compreender a importância de desenvolver um modelo numérico para quaisquer que sejam as aplicações de elementos estruturais ou não estruturais. O desenvolvimento do modelo numérico permite ao profissional capacitado uma leitura dinâmica sobre a estrutura a ser avaliada, mostrando leituras fundamentais de análise como deslocamentos ou colapso estrutural. Notou-se a grande influência na inclusão de imperfeições em barras submetidas a compressão e principalmente a importância em considerar a não linearidade em elementos estruturais, pois considerando imperfeições em barras, a compressão aplicada faz com que aumente a flexão cada vez mais.

A utilização de materiais alternativos, como a fibra de vidro, foi possível comprovar que não há eficiência no emprego para determinados elementos estruturais. Mesmo se tratando de um material com limite de ruptura elevado, acaba não sendo usual devido ao seu grande grau de flexibilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 7190 - Projeto de estruturas da madeira**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 107. 1997.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 221. 2003.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 8800**. ABNT/CB-002 Construção Civil. [S.l.]. 2008.

ABNT, A. B. D. N. T. **Indústria do Petróleo e gás natural - Perfis pultrudados**. ABNT. Rio de Janeiro. 2011.

AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J. **ANALYSIS AND PERFORMANCE OF FIBER COMPOSITES**. 3ª Edição. ed. New York: Wiley, 1990.

AGUIRRE, I. M. **Escora para a formação de cimbres e outras estruturas de suporte para construção**. MU 9100548-5 U2, 21 maio 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, M. O. C. P. **Building Code Requirements for Structural Concrete**. Texas: Institute American Concrete (ACI), 2014.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto amado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 317. 2003.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 5ª edição. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 590 p.

CICS, C. D. I. E. C. S. **INOVAÇÃO E O FUTURO DA CONSTRUÇÃO CIVIL. CONSTRUINDO O AMANHÃ**, SÃO PAULO, p. 81, Fevereiro 2019.

CONSTRUÇÃO FÁCIL, P. **PORTAL CONSTRUÇÃO FÁCIL**. **Portal Construção Fácil**, 2021. Disponível em: <<https://portalconstrucaofacil.com/>>. Acesso em: 26 abr. 2021.

DINIZ, C. W. S.; LAGES, E. N.; BARBOZA, A. S. R. Global stability of buildings' structural systems considering beam-wall connections. **IBRACON Structures and Materials Journal**, Alagoas, v. Vol. 12, n. Nº 4, p. 722, 14 Jun 2019.

FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2019. 568 p.

FIB. **Model Code**. [S.l.]: Ernst & Sohn, v. Volume 1, 2010. 318 p.

FIBERGLASS, T. TG Fiberglass. **Fiberglass**, 1995. Disponível em: <<https://www.tgfiberglass.com.br/>>. Acesso em: 17 maio 2021.

GALAMBOS, T. V. **GUIDE TO STABILITY DESIGN CRITERIA FOR METAL STRUCTURES**. NEW YORK: [s.n.], v. FIFTH EDITION, 1998.

GALLI, C. A. **Caracterização das Propriedades Mecânicas de Compósitos de Matriz de Epóxi com Fibras de Carbono Unidirecionais**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 49. 2016.

GIBSON, R. F. **Principles of composite materials mechanics**. New York: CRC Press, 1994.

INPI. INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. **INPI**, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/inpi/pt-br>>.

JUND MEGA, L. D. F. **Locação de ferramentas JUND MEGA. Locação de ferramentas JUND MEGA**, 1998. Disponível em: <<https://sh.com.br/pt/>>. Acesso em: 26 abr. 2021.

LUIZ, Z. C. Z. L. **Lajes Real. Lajes Real - A primeira em treliças**, 1977. Disponível em: <<https://lajesreal.blog/>>. Acesso em: 01 maio 2021.

MACGUIRE, W.; GAKKGER, R.; ZIEMIAN, R. D. **MATRIX STRUCTURAL ANALYSIS**. [S.l.]: [s.n.], 2014.

MENDES, C. L. **ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS DE PROJETOS EM FIBRA DE CARBONO COM VALORES DE PROPRIEDADES OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE**. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP. Bauru - SP, p. 75. 2018.

MENDONÇA, P. D. T. R. **MATERIAIS COMPOSTOS & ESTRUTURAS - SANDUÍCHE: PROJETO E ANÁLISE**. 2ª edição. ed. São Paulo: Editora Manole Ltda, 2005.

MIRANDA, A. F. **Escora metálica para escoramentos diversos**. MU 7502584-1 U, 05 maio 1998.

PIERIN, I. **Estudo de estabilidade de perfis pultrudados de materiais PRFV**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 181. 2005.

RESEARCHGATE. ResearchGate GmbH. **researchGate.net**, 2008. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/>>. Acesso em: 01 jun. 2021.

SOUZA, L. D. A. **APLICAÇÕES DE MATERIAIS COMPÓSITOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. **Revista Perspectivas Online**.

WEIHERMANN, F.; WETTER, M. R. **Disposição construtiva introduzida em dispositivo de travamento de escora para a construção civil**. BR 202014024431-5 U2, 26 abr. 2016.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **PLÁSTICOS DE ENGENHARIA TECNOLOGIA E APLICAÇÕES**. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2005.