

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO E PROTENDIDO EM EDIFICAÇÕES

JOHN RICARDO DA SILVA¹
JULIANO DA ROCHA SOARES²
KÊNIA ARAUJO DE LIMA SCARIOT³

RESUMO: A busca constante de novas tecnologias na construção civil, no intuito de proporcionar maior rapidez na execução, atrelado à qualidade e competitividade financeira, estabelece a necessidade explorar dois métodos construtivos para o elemento estrutural viga, tratando, nesse caso, das vigas em concreto armado e vigas em concreto protendido sem aderência, com a utilização de cordoalhas engraxadas. A presente pesquisa objetivou realizar um comparativo entre estes métodos bem como a viabilidade técnica e econômica, buscando evidenciar vantagens e desvantagens de ambos. A metodologia empregada baseou-se em estudos bibliográficos acerca do tema pesquisado, sob o ponto de vista técnico e econômico, buscando obter dados consistentes para indicar em qual situação torna-se viável a substituição do concreto convencional pelo protendido na execução de vigas de significativos vãos livres e com a atuação de cargas variadas. A pesquisa seguiu com o dimensionamento estrutural, calculando as áreas de armadura necessárias para resistir ao momento fletor e esforço cortante gerados nas vigas de concreto armado e concreto protendido, utilizando-se, para tanto, o mesmo vão e vinculações idênticas, e baseando-se, principalmente, na NBR 6118. Por meio das análises dos resultados, conclui-se que as vigas em concreto protendido apresentaram melhor desempenho estrutural, menores alturas e peso próprio quando comparadas às vigas de concreto armado, o que acarretou redução em relação aos custos dos insumos orçados para execução dos elementos. Em contrapartida, tal método construtivo impõe a necessidade de um controle rígido desde a elaboração do projeto, recebimento e armazenagem dos materiais até a execução.

PALAVRAS-CHAVE: Comparativo; Cordoalhas Engraxadas; Pós-Tensão

STUDY OF THE TECHNICAL AND ECONOMICAL FEASIBILITY OF BEAMS IN REINFORCED CONCRETE AND PRESTRESSED IN BUILDINGS

ABSTRACT: The constant search for new technologies in civil construction, in order to provide faster execution, coupled with quality and financial competitiveness, aims to explore two constructive methods for the structural element girder, in this case dealing with beams

¹ Acadêmico de Graduação, Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Sinop – FASIPE, Magda Cassia Pissinati, nº 69, Residencial Florença, Sinop - MT. CEP: 78555-392. Endereço eletrônico: johngazin@gmail.com

² Professor Co-orientador, Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Sinop – FASIPE, Rua Magda Cassia Pissinati, nº 69, Residencial Florença, Sinop - MT. CEP: 78555-392. Endereço eletrônico: eng.jorass@gmail.com

³ Professora Orientadora, Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Sinop – FASIPE, Rua Magda Cassia Pissinati, nº 69, Residencial Florença, Sinop - MT. CEP: 78555-392. Endereço eletrônico: keniaaraujolima@hotmail.com

in reinforced concrete and beams in prestressed concrete with no grease. The present research aimed at comparing these methods as well as the technical and economical feasibility, seeking to demonstrate advantages and disadvantages of both. The methodology used was based on bibliographical studies about the researched topic, from the technical and economic point of view, seeking to obtain consistent data that could indicate in which situation it becomes feasible the substitution of the conventional concrete by the prestressed in the execution of significant beams spans and various loads. The research followed with the structural dimensioning, calculating the areas of reinforcement necessary to resist the bending moment and shear stress generated in the reinforced concrete beams and prestressed concrete, using for that same span and identical bonds, and basing, mainly, in NBR 6118. Through the analysis of the results, it was concluded that the beams in prestressed concrete presented better structural performance, lower heights and own weight when comparing the reinforced concrete beams, which entailed a reduction in relation to the costs of the inputs budgeted for implementation of the elements. On the other hand, such a constructive method requires the necessity of a rigid control from the elaboration of the project, reception and storage of the materials until the execution.

KEYWORDS: Comparative; Cordages Greased; Post-tension

1. INTRODUÇÃO

O concreto destaca-se como sendo um dos materiais mais importantes na construção civil devido a suas excelentes características estruturais e elevada resistência, assim como a possibilidade de ser moldado das mais diversas formas com facilidade, auxiliando ainda na proteção dos aços empregados nos elementos estruturais. Os aços são responsáveis por fornecer maior resistência aos elementos quando estes forem submetidos a tensões de tração e compressão.

Conforme Carvalho (2012) o emprego de aços e concretos com maiores resistências na construção civil implica no surgimento da Protensão, em que os elementos protendidos sofrem a introdução de um estado prévio de tensões, com a finalidade de, em condições de serviço, impedir a fissuração e limitar os deslocamentos da estrutura, melhorando seu comportamento estrutural.

Cauduro (2002) destaca que a utilização da protensão possibilita executar elementos mais leves e esbeltos, permitindo ainda a redução de pilares, alcance de maiores vãos, maior controle de fissuras, bem como maior rapidez na execução.

Em pesquisa realizada por Giffhorn e Lazzari (2014) verificou-se um comparativo entre vigas em concreto armado e vigas em concreto protendido para grandes vãos, utilizando vinculações de mesma categoria, bem como o uso de iguais carregamentos atuantes. Para tanto, os autores concluíram que as vigas em concreto protendido apresentaram uma redução de 73,89% da área da seção de concreto e aproximadamente 77% do aço CA-50, consideradas as determinações estipuladas para o projeto. A redução significativa dos materiais aço e concreto obtida neste comparativo entre concreto armado e protendido reflete diretamente no peso

próprio dos elementos estruturais, assim como implica na redução dos custos quanto à execução.

De acordo com os fatos supracitados, torna-se viável um estudo mais minucioso para a região de Sinop/MT, visto que a protensão é uma técnica que vem sendo difundida há um curto período de tempo e ainda gera dúvidas quando os próprios profissionais de Engenharia precisam tomar a decisão acerca de qual tipo de viga optar, se armada ou protendida. Nesse sentido, a presente pesquisa teve como objetivo realizar uma análise estrutural acerca da viabilidade técnica e econômica da utilização de vigas em concreto armado e concreto protendido em obras residenciais, no sentido de analisar os comportamentos das estruturas em cada situação, conforme variação de vãos e carregamentos, assim como a esbeltez e deslocamentos destes elementos diante de cada circunstância. Por fim, quantificar os materiais aço, concreto e formas necessários em cada elemento estrutural.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Concreto armado

O concreto armado é o composto obtido devido à associação de concreto e barras de aço, estas posicionadas no interior do concreto com a finalidade de aumentar as suas propriedades mecânicas, absorvendo os esforços de tração e aumentando a capacidade de carga dos elementos. Essa junção acontece devido à aderência entre aço e concreto, que deve garantir que as deformações em ambos elementos sejam iguais. No concreto armado, o aço não sofre alongamento inicial antes da materialização dessa aderência. Nos projetos de estruturas de concreto armado, utiliza-se armadura passiva, sendo os aços admitidos aqueles pertencentes às categorias CA-25 (barras lisas), CA-50 (barras de alta aderência) e CA-60 (fios entalhados), conforme designados pela ABNT NBR 7480/2007.

2.2 Concreto protendido

Carvalho (2012) preconiza que o concreto protendido consiste no melhoramento das características do concreto armado e, segundo ele, caracteriza-se pela introdução de um estado prévio de tensões em uma estrutura de modo que seja aumentada sua resistência e seu comportamento diante das solicitações impostas à estrutura. Caracteriza-se pela composição de concreto e aço de maiores resistências se comparado com o concreto armado, na ordem de duas a três vezes maiores para o concreto e de três a cinco vezes para o aço. Como o concreto apresenta baixa resistência à tração, a protensão visa compensar essa deficiência do concreto anulando ou reduzindo estas tensões de tração fazendo o concreto trabalhar a compressão, que é sua característica principal.

Conforme Araújo (2014) o dimensionamento de elementos estruturais de concreto deve ser elaborado de forma que as verificações de segurança da estrutura em relação aos estados limite último e estado limite de serviço, sejam efetuadas conforme as combinações últimas e combinações de serviço.

De acordo com a ABNT (2014) NBR 6118 a fissuração em elementos de concreto armado é inevitável, pois valores críticos de tensão são adquiridos mesmo a estrutura sendo submetida a ações de serviço, sempre levando em consideração a baixa resistência à tração do concreto. Já em elementos de concreto protendido, existe também o risco do surgimento de fissuras, porém com menor probabilidade de ocorrência. Nesses elementos, quando há incidência de fissuras, estas podem ser muito mais prejudiciais devido ao aço encontrar-se sob

tensões elevadas. A fissuração pode ocasionar corrosão no aço se não controlada de imediato. O controle da fissuração deve, ainda, respeitar o limite de aceitação visual dos usuários.

A ABNT (2014) NBR 6118 preconiza que os níveis de protensão estão diretamente ligados aos efeitos finais da intensidade da força de protensão, sendo elas em função do volume de armadura ativa em relação às armaduras passivas; e ainda estabelecidos, levando em consideração a classe de agressividade do meio ao qual estão inseridas. Os níveis correspondem aos estados limites de utilização referentes à fissuração e podem ser classificados, conforme o Quadro 1.

Quadro 1: Níveis de protensão

Níveis de Protensão	
Completa	Utilizada quando se têm ambientes muito agressivos. Neste caso, observam-se duas condições, a combinação frequente de ações, onde é respeitado o limite de descompressão (ELS-D) e a combinação rara de ações, onde é respeitado o limite de formação de fissuras (ELS-F).
Limitada	Para ambientes medianamente agressivos, respeitando ainda as duas condições, a primeira quando se tem combinação quase permanente de ações, é respeitado o limite de descompressão (ELS-D) e quando houver a combinação frequente de ações, é respeitado o limite de formação de fissuras (ELS-F).
Parcial	Utilizada em ambientes pouco agressivos, respeitando a condição de quando se tem combinações frequentes de ações, é respeitado o estado limite de abertura nas fissuras (ELSW).

Fonte: Adaptado da ABNT (2014) NBR 6118

De acordo com Cholfé e Bonilha (2018) os aços de protensão podem ser pré-tracionados ou pós-tracionados. No sistema de pré-tração, o aço é tensionado antes do lançamento e moldagem dos elementos estruturais. Enquanto no sistema de pós-tração, o aço recebe alongamento após a cura total ou parcial do concreto. Estes sistemas estão relacionados no Quadro 2.

Quadro 2: Sistemas de protensão

Sistemas de Protensão	
Pré-tração	No sistema de pré-tração, o aço é alongado antes da concretagem do elemento, fator que propicia uma total aderência entre aço e concreto em toda a extensão do elemento, geralmente são peças moldadas em pistas de protensão. Após a cura do concreto, o aço é cortado e tende a voltar a seu estado original devido ao seu patamar elástico, exercendo, desta forma, uma força de compressão na peça de concreto.
Pós-tração com aderência posterior	No sistema pós-tracionado com aderência posterior, o aço é tracionado após o endurecimento do concreto. Nesse processo, utilizam-se bainhas que acomodarão os cabos de acordo com o traçado designado em projeto. Após o alongamento dos cabos, faz-se a injeção de nata de cimento na bainha, alcançando, assim, a aderência necessária entre aço e concreto.

Pós-tração sem aderência	No sistema pós-tração sem aderência, utilizam-se cordoalhas engraxadas que são revestidas por polietileno de alta densidade, que juntamente da graxa fornecem proteção ao aço e ainda ajudam a diminuir o atrito entre aço e concreto no momento do alongamento. Nesse sistema, o aço é traçado após o endurecimento do concreto, ou a partir do momento em que o mesmo atinja determinada resistência estipulada em projeto, fornecendo ao elemento estrutural a resistência necessária para cada situação.
---------------------------------	--

Fonte: Adaptado da ABNT (2014) NBR 6118

Conforme Carvalho (2012) a pós-tração em elementos protendidos se dá após o endurecimento do concreto, quando as armaduras ativas são traçadas, conforme especificação em projeto e a ancoragem utilizada é a própria face do elemento. Contudo, neste método não há aderência entre armadura e concreto.

De acordo com Cauduro (2002) a tração do aço na pós-tração pode ser iniciada após o concreto atingir 75% da sua resistência de projeto, inicia-se, então, a compressão do concreto. Preconiza ainda que a cordoalha engraxada recebe um banho de graxa mineral e por extrusão recebe o revestimento de polietileno de alta densidade (PEAD) com espessura mínima de 1 mm e que permita a livre movimentação do cabo em seu interior, este posteriormente é utilizado na protensão não aderente ao concreto.

Os cabos tipo monocordoalha engraxada utilizados em protensão não aderente possuem por si só uma especial proteção contra corrosão, pois a graxa introduzida no momento da fabricação, além da proteção da peça tem fator importantíssimo de facilitar o alongamento dos cabos durante a compressão do concreto. Devido à maneira como são produzidas as monocordoalhas, não há entrada ou permanência de água ou qualquer outro composto que possa vir agredir os cabos.

2.3 Vantagens e desvantagens do concreto armado e concreto protendido

De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2007) como qualquer material que venha a ser utilizado para determinadas finalidades, o concreto armado possui vantagens e desvantagens em relação à sua função estrutural. Da mesma forma, Cauduro (2002) apresenta os prós e contras quanto ao uso do concreto protendido. No Quadro 3, estão destacadas algumas destas características.

Quadro 3: Vantagens e desvantagens do concreto armado e protendido

	Vantagens	Desvantagens
Concreto Armado	Boa resistência mediante diversas solicitações	Peso próprio elevado
	Boa trabalhabilidade	Baixa resistência à tração
	Compete economicamente com o aço	Difícil execução de reformas e adaptações
	Durabilidade e resistência ao fogo	Efeitos de retração e fluência
	Resistente a choques, vibrações, efeitos térmicos e desgastes mecânicos	Surgimento de fissuras, propagação de calor e som e restrição a grandes vãos
Concreto Protendido	Uso de aço e concreto de alta resistência	Maior controle de execução devido ao concreto de maior resistência
	Redução da altura e peso total da estrutura devido à possibilidade de eliminação de vigas	Cuidados especiais com os aços de alta resistência para evitar corrosão
	Redução do número de pilares e possibilidade de alcance de maiores vãos	Controle rígido quanto ao posicionamento das armaduras
	Maior controle de flechas e fissuras	Equipamentos e mão de obra especializada para operar a protensão
	Custo de manutenção reduzido	Atenção e controle superiores aos necessários para o concreto armado

Fonte: Adaptado de Carvalho e Figueiredo Filho (2007)

2.4 Ações e segurança nas estruturas de concreto

A ABNT (2014) NBR 6118 preconiza que as estruturas de concreto devem atender três requisitos mínimos de qualidade durante o processo construtivo, bem como durante a vida útil da estrutura, sendo designadas como a capacidade resistente (segurança à ruptura), o desempenho em Serviço que está relacionado com a capacidade da estrutura em se manter em condições de utilização durante a vida útil, sem apresentar danos que comprometam a utilização para qual foi projetada, a estrutura deve garantir ainda a durabilidade.

As estruturas de concreto armado e concreto protendido são projetadas para suportarem, durante sua vida útil, ações permanentes, variáveis e excepcionais, levando em consideração as cargas que irão atuar sobre a estrutura; para tanto, são verificados os estados limites último e de serviço sob um aspecto de combinação de ações. Em elementos protendidos, o dimensionamento é realizado considerando o estado limite de utilização e, posteriormente, os estados limites últimos, onde se aplicam os coeficientes de segurança tanto para cargas quanto para resistências, visando levar a estrutura a trabalhar longe do seu estado de ruína, chegando, assim, aos valores de cálculo.

De acordo com a ABNT (2000) NBR 6120 as ações atuantes em estruturas de concreto são classificadas conforme sua variabilidade no tempo, como as ações permanentes, ações variáveis e as ações excepcionais. Em ações permanentes são considerados os pesos próprios dos elementos estruturais, elementos construtivos, equipamentos fixos, recalques, retração, fluência e protensão. Nas ações variáveis, são consideradas as cargas acidentais da construção, incluindo os efeitos como forças de frenagem, impactos e centrífugas, efeitos do vento, variações de temperatura e as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas.

De acordo com o supramencionado, as ações excepcionais são aquelas que têm um período de duração curto e com probabilidade de ocorrência quase nula durante a vida útil da estrutura, porém devem ser levadas em consideração em fase de projeto; a saber: as explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes ou sismos excepcionais.

Conforme a ABNT (2004) NBR 8681 além das ações supracitadas no parágrafo anterior, as ações atuantes nas estruturas de concreto protendido ainda contemplam ações de combinações em serviço, considerando o tempo de atuação. Essas combinações são classificadas como: quase permanentes, frequentes e raras. Nas combinações quase permanentes, pressupõe-se que estas atuarão nas estruturas durante grande parte de sua vida útil, fazendo-se necessário, neste caso, verificar o estado limite de deformação excessiva, ao qual as estruturas estão sujeitas. Nas combinações frequentes, as ações repetem-se constantemente nas estruturas durante sua vida útil.

Conforme sobredito, faz-se necessária, ainda, a verificação do estado limite de formação e abertura de fissuras e vibrações excessivas. Nas combinações raras, as ações incidem sobre as estruturas apenas algumas vezes durante toda sua vida útil. Para sua consideração, pode fazer-se necessária a verificação do estado limite de formação de fissuras.

A ABNT (2014) NBR 6118 determina que a estrutura deve ser projetada e construída de modo que, quando sujeita às condições ambientais calculadas em projeto, esta mantenha a segurança, estabilidade e durabilidade. Os mecanismos de deterioração do concreto compreendem a lixiviação, que é provocada pela água que dissolve compostos da pasta de cimento, cabendo ao projetista identificar a presença de água e tomar medidas preventivas. A deterioração das armaduras do concreto armado consiste na ação do gás carbônico da atmosfera e de cloretos sobre o aço da armadura. Os aços utilizados na protensão sofrem os mesmos efeitos de

deterioração, porém sob tensão, tornando-os mais sensíveis à corrosão. Esse fator implica em um cuidado especial com esse material desde a sua fabricação até a utilização.

De acordo com Bauer (2008) a deterioração de uma estrutura acontece de forma progressiva, ou seja, cedo ou tarde a estrutura tende a apresentar alguma espécie de dano. Esses danos são provenientes de erros de projeto estrutural, utilização de materiais impróprios, erros de execução e pela agressividade do meio ambiente.

A segurança em uma estrutura é obtida desde a fase projetual, não só na fase de utilização da obra, devendo ser tratada utilizando cobrimentos corretos, analisando a classe de agressividade ambiental, não prever estruturas superarmadas, utilização de concreto com resistência adequada, execução de qualidade, entre outros. A agressividade ambiental segue a ABNT (2014) NBR 6118, a qual leva em consideração a classe de agressividade do ambiente, tendo o cobrimento nominal determinado a partir desta. O cobrimento mínimo das armaduras é o menor valor que deve ser respeitado por toda a extensão do elemento estrutural considerado.

Conforme a ABNT (2014) NBR 6118 a durabilidade das estruturas de concreto está fortemente vinculada às características do concreto utilizado, sua espessura e qualidade do cobrimento da armadura. A qualidade do concreto está diretamente relacionada à classe de agressividade do ambiente onde a estrutura será executada.

2.5 Força de protensão

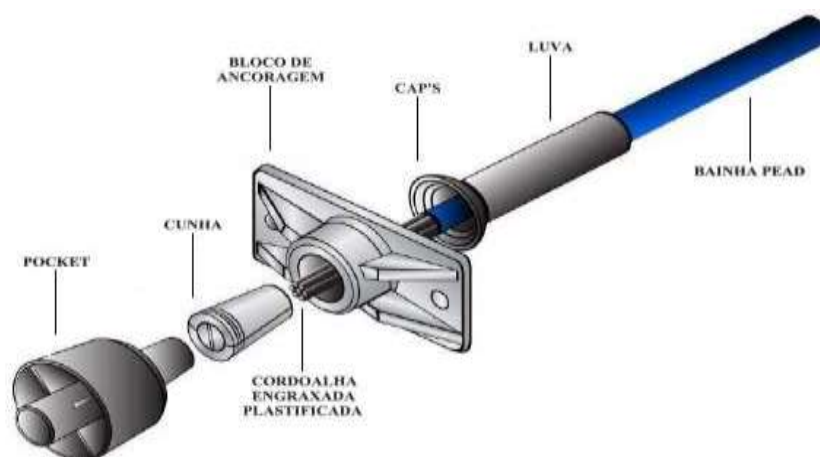
De acordo com Cholfé e Bonilha (2013) para determinação da força de protensão, é necessário estipular diversos parâmetros como: as ações que agem sobre a estrutura, características dos materiais que compõem a estrutura, determinação da seção transversal e pré-dimensionamento da peça, esforços devido a cargas atuantes na estrutura, grau de protensão solicitado e estimativas das perdas de protensão que atuarão no elemento estrutural.

É através desta determinação que é calculado o dimensionamento dos cabos de protensão.

Conforme a ABNT (2014) NBR 6118 as estruturas protendidas, prevendo a segurança, devem levar em consideração as perdas de protensão imediatas e progressivas. As perdas imediatas ocorrem durante ou logo após o processo de protensão, entre elas estão o encurtamento imediato do concreto, atrito entre o aço e a bainha e também a acomodação das ancoragens no concreto. Nas perdas progressivas, leva-se em consideração a fluência, retração e a relaxação dos cabos de protensão.

Verissimo e César Junior (1998) observam que para transferir ao concreto as elevadas tensões aplicadas em estruturas de concreto protendido, são necessários vários elementos, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1: Elementos utilizados na protensão sem aderência

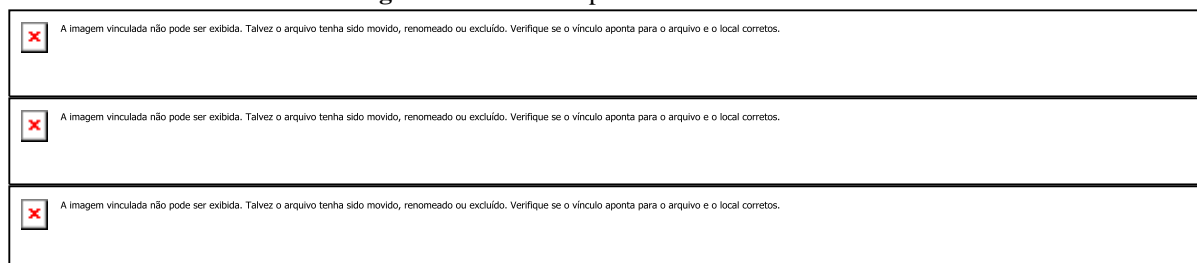


Elemento	Função
Pocket	Fundamental para formar o nicho de protensão para cordoalha, é necessário que seja acoplado à ancoragem com auxílio de cunhas bipartidas para agrupamento dos acessórios.
Cunha	Peças cônicas de metal responsáveis por morder o aço de protensão durante a transferência da força de protensão do macaco hidráulico para a ancoragem.
Cordoalha engraxada plastificada	Fabricadas a partir de processo contínuo, possuindo graxa entre a cordoalha e o revestimento PEAD. Disponíveis em bitolas 12,7 e 15,2 mm. Utilizada na pós-tensão sem aderência. A força de protensão é transferida para o concreto através das ancoragens.
Bloco de ancoragem	Bloco de ferro fundido responsável por receber as cunhas que fazem a travacão do cabo tensionado e transmitem os esforços para o elemento estrutural.
Cap's	Indicados como adaptadores de ancoragem, auxiliando no posicionamento da cordoalha e na construção do nicho de proteção, bem como juntar o tubete plástico com a ancoragem.
Luya	Tubo plástico conectado ao cap's.
Bainha PEAD	A bainha PEAD é formada de poliuretano de alta densidade e além de proteger a armadura ativa com a graxa presente, é responsável pela diminuição do atrito no instante de protensão.

Fonte: Adaptado de Catálogo Rudloff (2015)

Na Figura 2 observa-se a seção transversal de uma viga que está recebendo a protensão não aderente, assim como os demais elementos que, em conjunto, transferem as forças de protensão ao concreto.

Figura 2: Sistema de protensão sem aderência



Elemento	Função
----------	--------

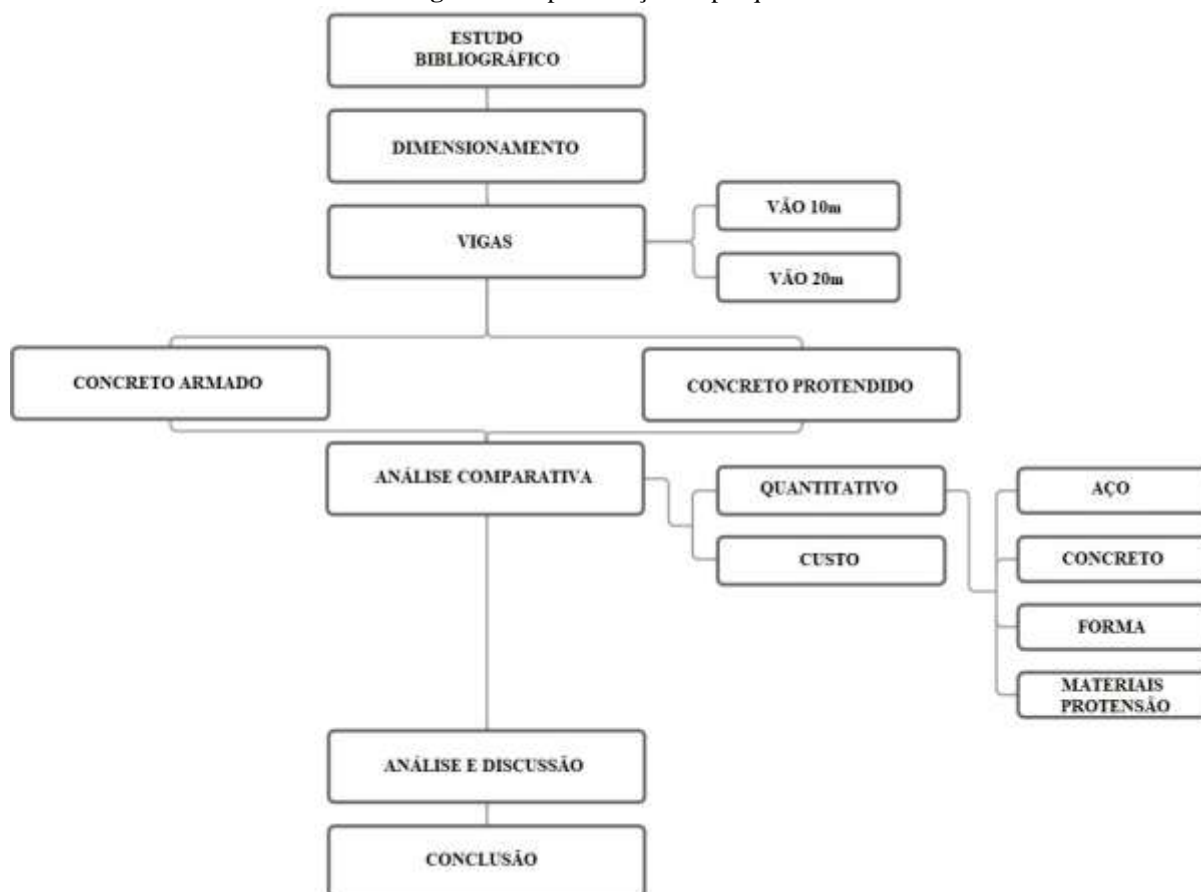
Armadura de fretagem	Essas armaduras têm a função de resistir aos esforços de tração decorrentes da aplicação concentrada das forças de protensão e controlar uma possível fissuração.
Ancoragem ativa	São os dispositivos responsáveis por manter o aço em estado de tensão, transferindo-as para o elemento estrutural.
Ancoragem ativa précravada ou passiva	Ancoragem da ponta final do cabo, normalmente colocada e fixada numa das extremidades por pré-blocagem. Esta ancoragem comumente não é utilizada para aplicar a protensão ao cabo.
Nicho	Forma plástica onde se instala a ancoragem. Vide item 1 do Quadro 4.
Cordoalha engraxada	É o cabo em que o aço de protensão não adere ao concreto, ficando livre para se mover em relação a ele. Vide item 3 do Quadro 4.

Fonte: Adaptado de Catálogo Rudloff (2015)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa iniciou-se com um estudo bibliográfico a fim de embasar um comparativo entre dois métodos construtivos, o concreto armado (CA) e o concreto protendido (CP), para o elemento estrutural viga, conforme designado no fluxograma da Figura 3.

Figura 3: Representação da pesquisa



Fonte: Própria (2019)

3.1 Ferramentas de dimensionamento dos elementos

Para o dimensionamento das peças em concreto armado e concreto protendido, utilizaram-se os *softwares* comerciais Eberick 2018 e TQS 2019, responsáveis por gerar os quantitativos apresentados nos Gráficos no tópico 4 Resultados e Discussão. Nesta análise, foram consideradas situações hipotéticas para as quais se adotaram vigas isostáticas bi apoiadas de seção retangular. As vigas analisadas possuem comprimentos de 10 e 20 m, havendo, para ambos, carregamentos distintos como o seu peso próprio e cargas acidentais.

3.2 Considerações das vigas em concreto protendido

Os projetos das vigas em concreto protendido foram disponibilizados pela empresa Vetor Protensão, empresa sólida e conceituada na cidade de Sinop/MT e também na região. A empresa é uma das pioneiras na região no ramo da protensão, possuindo profissionais de alta qualidade tanto para projeto quanto para execução.

As cargas consideradas na viga protendida de 10 m (V1S2) foram o seu peso próprio de 312,5 Kgf/m já acrescido aos carregamentos de 830 Kgf/m que corresponde às lajes que se apoiam sobre ela, além das cargas adicionais com intensidade 500Kgf/m e acidentais correspondente a 250 Kgf/m. Os pilares de apoio da viga protendida possuem dimensões de 20x30 cm e as lajes treliçadas que incidem sobre esta têm dimensões de 5x10 m com espessura de 13 cm cada. Na viga protendida com comprimento de 20 m (V2S2), os pilares de apoio possuem dimensões de 20x50 cm, porém, como se trata de uma viga de fachada, esta não possuiu carregamento estrutural além do peso próprio de 312,5 Kgf/m e das cargas permanentes e acidentais consideradas que representam 65 Kgf/m respectivamente. Para os elementos vigas em concreto protendido foi utilizado concreto C35 com resistência à compressão do concreto aos 28 dias (fck) de 35MPa, sendo considerada a Classe de Agressividade II correspondente à área urbana, que fora determinado pelo Engenheiro calculista um cobrimento nominal mínimo de 30 mm, conforme a tabela 7.2 da ABNT (2014) NBR 6118. O aço das armaduras passivas utilizado trata-se do aço para concreto armado com resistência característica de escoamento de 50 Kgf/mm² (CA-50), já o aço das armaduras ativas corresponde ao aço para concreto protendido com resistência mínima à ruptura por tração de 190 kN/cm² de relaxação baixa (CP 190 RB), composto de cordoalhas engraxadas de 12.7 mm cada. O sistema de protensão utilizado foi o de pós-tração sem aderência. A intensidade de força utilizada corresponde ao nível 2, classificada como protensão limitada.

3.3 Considerações para dimensionamento das vigas em concreto armado

Os elementos vigas em concreto armado foram calculadas e dimensionadas, levando em consideração o mesmo carregamento, peso próprio e cargas acidentais, aplicado nas vigas de concreto protendido, assim como a classe de agressividade utilizada e os vãos a vencer. Neste dimensionamento, foram analisados os deslocamentos e a esbeltez dos elementos em ambos os casos. Os pilares de apoio das vigas de 10 e 20 m também permaneceram com mesma dimensão dos utilizados nas vigas protendidas.

Nas vigas em concreto armado, como parâmetro de comparação, também fora utilizado concreto C35 com fck de 35MPa, considerando a mesma classe de agressividade ambiental II, remetendo a um cobrimento nominal mínimo de 30 mm. O aço utilizado trata-se de CA-50 para as armaduras passivas. Nas vigas em concreto armado com comprimentos de 10 e 20 m, (V1S1) e (V2S1) respectivamente, foi obrigatório o uso de armadura de pele, pois alcançou-se altura superior a 60 cm.

3.4 Deslocamentos nos elementos estruturais

Quanto aos deslocamentos, estes foram analisados sob o seguinte aspecto: ao definir carregamentos de igual intensidade para ambos os elementos vigas, os elementos em concreto armado foram dimensionados de modo que a seção transversal fosse suficiente para alcançar aproximadamente os mesmos deslocamentos observados nas vigas de concreto protendido. Já no parâmetro esbeltez, refere-se à seção necessária aos elementos em concreto armado para atingir as mesmas deformações.

3.5 Normas utilizadas no dimensionamento

Baseado nas NBR's que regulamentam a construção civil, a confecção de projetos deve seguir uma padronização, bem como a execução da estrutura a fim de proporcionar segurança e qualidade do produto final. O Quadro 4 apresenta as principais normas empregadas no processo de dimensionamento e execução de peças em concreto armado e concreto protendido.

Quadro 4: Normas técnicas adotadas para dimensionamento das vigas

Norma	Designação
ABNT (2014) NBR 6118	Projeto de estruturas de concreto - Procedimento
ABNT (2000) NBR 6120	Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimento
ABNT (1988) NBR 6123	Forças devidas ao vento em edificações – Procedimento
ABNT (2008) NBR 6349	Barras, cordoalhas e fios de aço para armaduras de protensão – Ensaio de tração
ABNT (2007) NBR 7480	Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação
ABNT (2008) NBR 7482	Fios de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação
ABNT (2008) NBR 7483	Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação
ABNT (2004) NBR 8681	Ações e segurança nas estruturas - Procedimento

Fonte: Adaptado ABNT (2014) NBR 6118

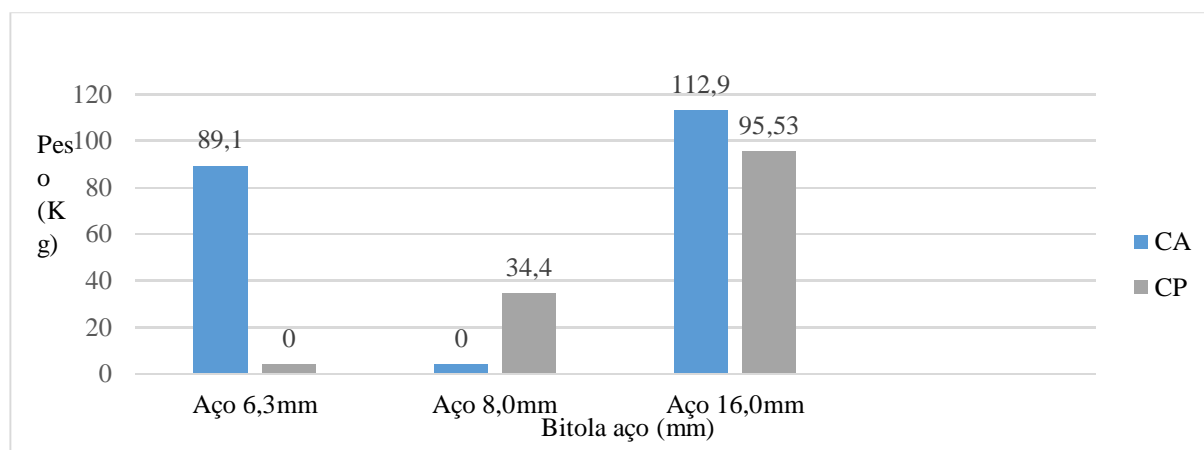
Nas estruturas de concreto armado e protendido analisadas, os cálculos realizaram-se sempre levando em consideração os requisitos e critérios básicos relacionados à segurança, o bom desempenho em serviço e a durabilidade. O objetivo de garantir a qualidade das estruturas é possibilitar que tais requisitos sejam atendidos de maneira econômica.

Para cada condição das vigas, tanto em concreto armado quanto protendido, realizou-se um levantamento quantitativo de materiais (aço, concreto e forma), gerados pelos *softwares* Eberick e TQS, necessários em cada circunstância, no intuito de avaliar a viabilidade econômica em cada método, sendo o custo dos materiais obtidos através do Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil (SINAPI) para o Estado de Mato Grosso e pesquisa em empresas fornecedoras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Gráfico 1 apresenta o insumo aço CA-50 necessário para execução do elemento estrutural viga de comprimento 10 m tanto em concreto armado quanto em protendido.

Gráfico 1: Consumo de aço para vigas de 10 m



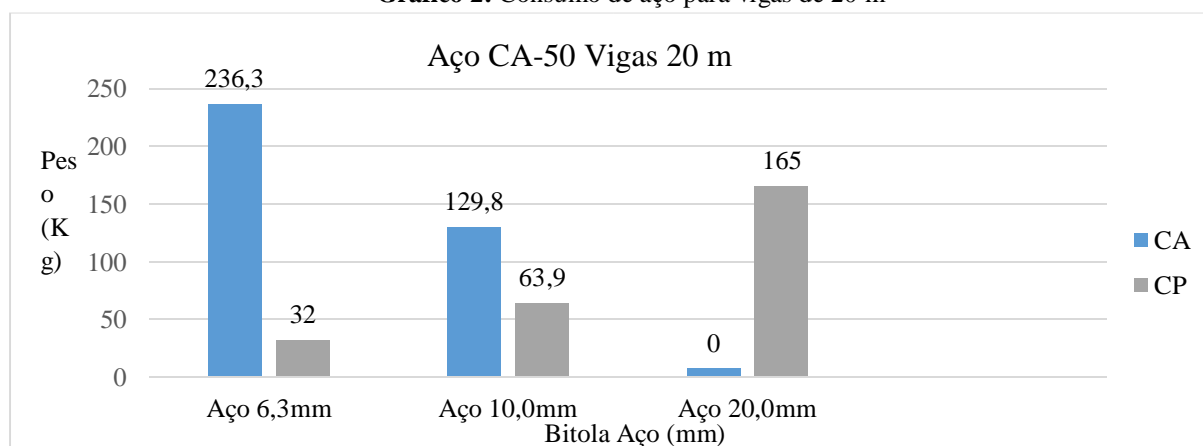
Fonte: Própria (2019)

Aço CA-50 Vigas 10 m

O Gráfico 1 possibilita identificar que o consumo de aço com bitola 6,3 mm foi necessário somente na viga em concreto armado com comprimento de 10 m, (V1S1), 89.1 Kg de armadura destinada aos estribos e a armadura de pele do elemento; enquanto na viga em concreto protendido com comprimento de 10 m (V1S2), a ferragem indicada para os estribos foi de 8,0 mm e um total de 34.4 Kg. O aço de 16,0 mm fora necessário para ambas as vigas, V1S1 e V1S2 como elemento destinado a resistir aos esforços de tração e compressão, sendo que na V1S2 esse aço trabalha em conjunto com a armadura ativa. No elemento V1S1, o consumo de aço de 16,0 mm foi 18,18% maior que no V1S2.

O Gráfico 2 apresenta o consumo de aço CA-50 necessário para a moldagem de uma viga com comprimento de 20 m tanto em concreto armado quanto protendido.

Gráfico 2: Consumo de aço para vigas de 20 m

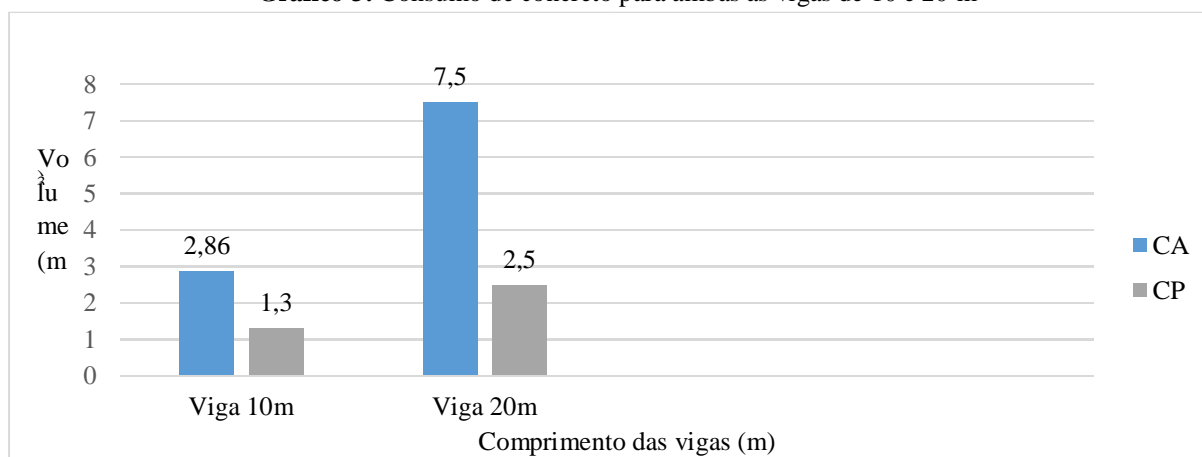


Fonte: Própria (2019)

O aço com bitola de 6,3 mm foi utilizado na viga de concreto armado de comprimento 20 m (V2S1) como armadura de estribo e de pele, tendo um consumo 638,44% maior que na viga de concreto protendido de comprimento 20 m (V2S2). Já em relação ao consumo de aço 10,0 mm a V2S1, teve um consumo 103,13% maior que a V2S2. A bitola 16,0 mm, somente a V2S2 teve consumo, sendo este corresponde a 165 Kg.

Em ambas situações de dimensionamento dos elementos estruturais, procedeu-se a uma estimativa do consumo de concreto com resistência de 35MPa aos 28 dias (C-35) necessário para moldagem destes, a representação dos volumes está apresentada no Gráfico 3.

Gráfico 3: Consumo de concreto para ambas as vigas de 10 e 20 m



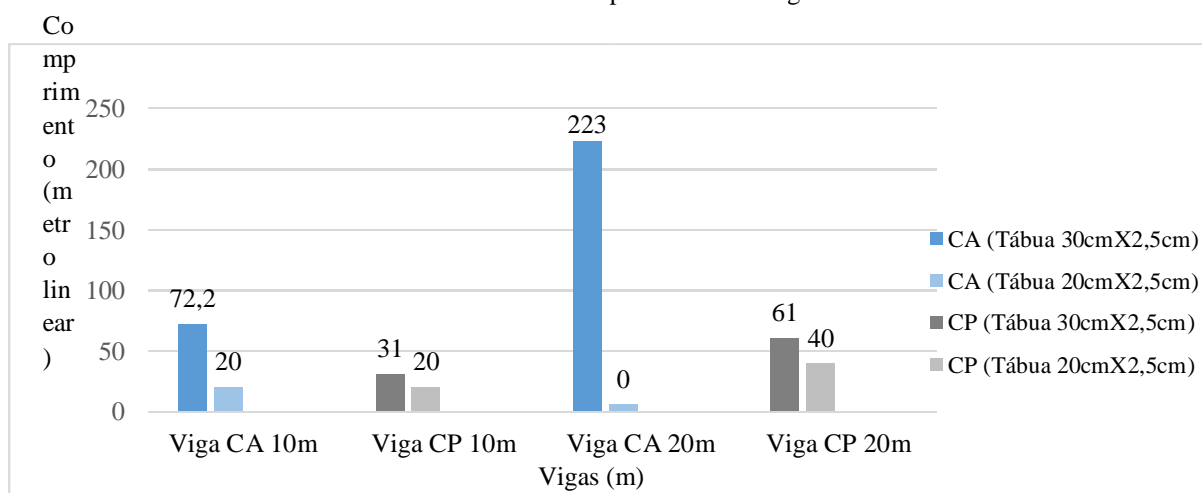
Fonte: Própria (2019)

Consumo de concreto C-35 vigas 10 e 20 m

Nos elementos com comprimento 10 m, a partir do Gráfico 3 é possível observar que V1S1 obteve um consumo de concreto de 120% maior que a V1S2. Nas vigas com comprimento de 20 m, a viga V2S1, esse consumo apresentou-se 200% maior que o elemento V2S2.

Outro fator analisado foi o quantitativo de formas necessárias para moldagem das caixarias para concretagem de todos os elementos estruturais dimensionados. Para essa avaliação, considerou-se a utilização de tábuas de madeira serrada bruta e a estimativa apresentada em metros lineares, conforme Gráfico 4.

Gráfico 4: Consumo de formas para ambas as vigas de 10 e 20 m



Formas para moldagem das vigas

Fonte: Própria (2019)

O Gráfico 4 representa o insumo formas necessárias para moldagem dos elementos estruturais V1S1, V1S2, V2S1 e V2S2 condizem com tábuas brutas de madeira serrada com dimensões de 30 cm x 2,5 cm e 20 cm x 2,5 cm sem consideração de reaproveitamento. Conforme o Gráfico 4, V1S1 obteve um consumo de 132,9% maior que a V1S2 em tábuas de largura 30 cm. Analisando os mesmos elementos acima citados, ambos apresentaram um consumo igual de tábuas de largura 20 cm, o que corresponde a 20 metros lineares.

Considerando os resultados apresentados para os elementos vigas com comprimentos de 20 m, tem-se que a V2S1 com consumo de 265,57% maior que a V2S2 na utilização de tábuas de largura de 30 cm para confecção das caixarias. O consumo de tábuas de largura 20 cm foi observado somente no elemento V2S2, correspondendo a 40 metros lineares.

Nos elementos V1S2 e V2S2 correspondentes as vigas protendidas, além da utilização das armaduras passivas conforme demonstrado nas Figuras 1 e 2 ainda se tem o uso de outros materiais responsáveis pela introdução da protensão nos elementos estruturais, conforme designado no Quadro 5.

Quadro 5: Materiais utilizados na protensão das vigas V1S2 e V2S2.

Material	Unidade	V1S2	V2S2	Custo un. (R\$)	Custo total V1S2 (R\$)	Custo total V2S2 (R\$)
Cordoalha CP-190 RB 12,7 mm	Kg	61,0	56,1	11,00	671,00	617,10
Ancoragem 12,7 mm	un.	12	6	11,00	132,00	66,00
Cunha bipartida (par)	un.	12	6	6,80	81,60	40,80
Luva 40 cm	un.	6	3	1,60	9,60	4,80
Nicho AP1	un.	6	3	0,80	4,80	2,40
PPC – Tampa de acabamento	un.	6	3	0,50	3,00	1,50
Fretagem aço CA-50 10,0 mm	Kg	1,813	3,625	5,00	9,07	18,12

Fonte: Própria (2019)

Conforme discriminado no Quadro 5, tem-se os custos adicionais nos elementos em concreto protendido V1S2 e V2S2, correspondentes a R\$ 911,07 e R\$ 750,72 respectivamente. No Quadro 6, quantificam-se os insumos aço, concreto, formas e materiais para protensão necessários para confecção das vigas em concreto armado e protendido.

Quadro 6: Custo dos materiais para confecção das vigas

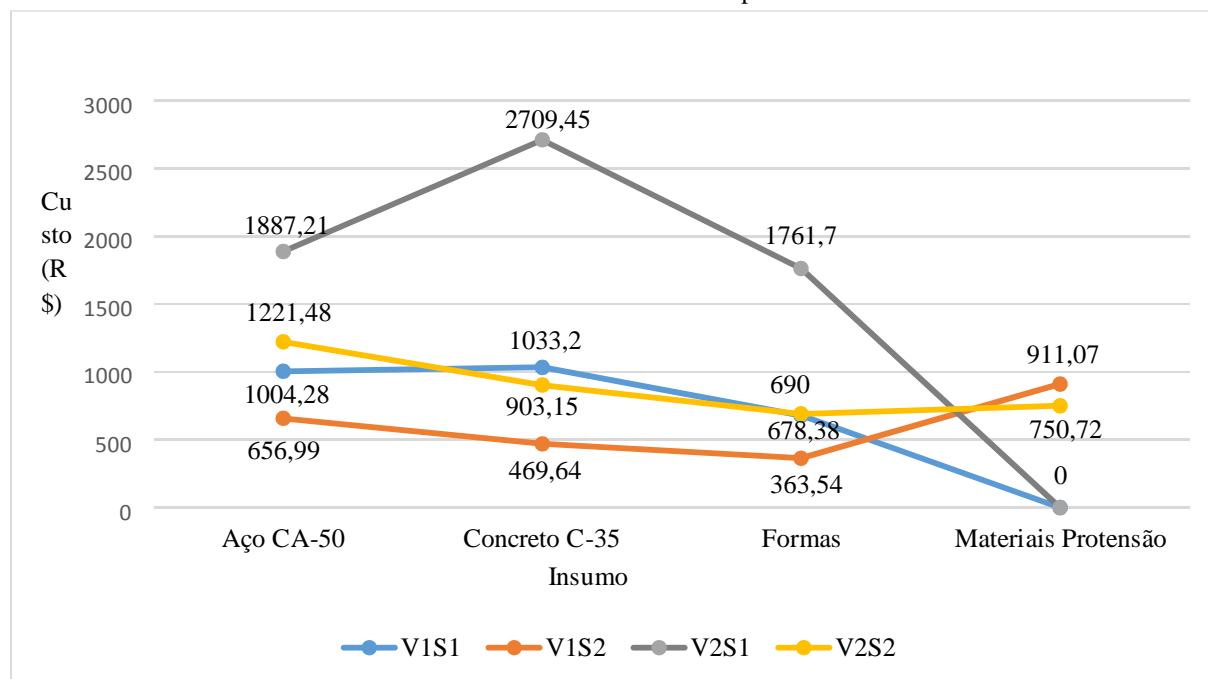
Insumos	V1S1	V1S2	V2S1	V2S2
Aço CA-50 6,3 mm	466,88	-	1.238,21	167,73
Aço CA-50 8,0 mm	-	202,27	-	-
Aço CA-50 10,0 mm	-	-	649,00	319,50
Aço CA-50 16,0 mm	537,40	454,72	-	-
Aço CA-50 20,0 mm	-	-	-	734,25
Concreto C-35	1.033,20	469,64	2.709,45	903,15
Formas	678,38	363,54	1.761,70	690,00
Materiais Protensão	-	911,07	-	750,72
TOTAL	R\$ 2.715,86	R\$ 2.401,24	R\$ 6.358,36	R\$ 3.565,35

Fonte: Própria (2019)

Conforme representado no Quadro 6, para as vigas de 10 m, observou-se uma divergência de preços de aproximadamente R\$ 314,62, o que corresponde a um percentual de 13,1% de acréscimo do elemento em CA em relação ao CP. Comparando as vigas de 20 m, o valor foi mais significativo, o que demonstrou um acréscimo percentual de 78,34% no elemento em CA em relação ao elemento em CP, em Reais esse valor é estimado em R\$ 2793,01.

O Gráfico 5 representa o custo total por insumos necessários para moldagem de cada elemento estrutural analisado.

Gráfico 5: Gráfico do custo total por insumo



Custo total por insumo

Fonte: Própria (2019)

Para dimensionamento dos elementos em concreto armado, foram considerados os mesmos critérios utilizados para as vigas protendidas, respeitando sempre a espessura do elemento estrutural e variando sua altura a fim de compará-los sem necessidade de alteração nos demais elementos que compõem a estrutura. Para tanto, com o objetivo de alcançar os mesmos deslocamentos em ambas as vigas de comprimentos iguais, foi encontrado um deslocamento na ordem de 2,20 cm nos elementos V1S1 e V1S2, enquanto os elementos V2S1 e V2S2 obtiveram uma deformação de aproximadamente de 1,50 cm.

5. CONCLUSÃO

A partir da análise do dimensionamento dos elementos estruturais de concreto armado e concreto protendido em iguais circunstâncias de localização, carregamentos e vínculos, foi possível chegar às seguintes conclusões.

Tratando-se das áreas da seção transversal, a viga em CA com comprimento 10 m apresentou um aumento de 120% sob a viga em CP de mesma extensão. Já a viga em CA com 20 m de comprimento sofreu um aumento de 200% em área de seção. Esse aumento percentual em

ambas dimensões analisadas remete ao aumento significativo do peso próprio estrutural dos elementos em concreto armado e, conseqüentemente, em uma maior intensidade dos carregamentos submetidos à fundação. O intuito da investigação dos dimensionamentos consistiu em alcançar, em ambas situações de comprimentos e métodos construtivos, uma mesma deformação, situação que levou as vigas em CA necessitarem de alturas muito superiores em relação às vigas em CP.

As vigas em CP de comprimentos 10 e 20 m foram dimensionadas com seções iguais de 0.25 m de base e 0.50 m de altura. Mantendo a mesma base para os elementos em CA e variando somente suas alturas, alcançaram-se valores de 1.10 m e 1.50 m, implicando, dessa forma, em aumento considerável da esbeltez nesses elementos, com percentuais de aproximadamente 120% e 200% respectivamente. A viga V1S1 em relação à V1S2 obteve um acréscimo na ordem de 13% nos custos totais dos insumos analisados. Já para a viga V2S1 quando comparada com a V2S2, o aumento foi mais significativo, chegando a aproximadamente 78%.

Diante dos dimensionamentos realizados e considerando os aspectos analisados nos elementos estruturais vigas, conclui-se que, conforme o aumento dos vãos e carregamentos submetidos aos elementos, as vigas em CP possuem vantagens técnicas e econômicas sob as vigas em CA, pois ambas apresentaram redução em relação aos custos dos principais insumos necessários para sua moldagem. Houveram consideráveis reduções do peso próprio dos elementos em CP que atingiram 120% nos elementos com comprimento de 10 m e um percentual de 200% para os elementos de comprimento 20 m.

Como sugestão para futuras pesquisas, recomenda-se analisar o custo de execução dos elementos, comparando-o com outros métodos construtivos, por exemplo, a estrutura metálica, ou utilizar outro sistema de protensão, a exemplo da pós-tensão com aderência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AltoQi, Eberick Versão V18 Gold Next, 2018.

ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. Dunas, 3ª Ed. V. 1, Rio Grande, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.

_____. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimento**. NBR 6120, Rio de Janeiro, 2000.

_____. **Forças devidas ao vento em edificações – Procedimento**. NBR 6123, Rio de Janeiro, 1988.

_____. **Barras, cordoalhas e fios de aço para armaduras de protensão – Ensaio de tração**. NBR 6349, Rio de Janeiro, 2008.

_____. **Aço destinado para estruturas de concreto armado – Especificação**. NBR 7480, Rio de Janeiro, 2007.

_____. **Fios de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação.** NBR 7482, Rio de Janeiro, 2008.

_____. **Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação.** NBR 7483, Rio de Janeiro, 2008.

_____. **Ações e segurança nas estruturas – Procedimento.** NBR 8681, Rio de Janeiro, 2004.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção.** Editora LCT, 3ª Ed. Rio de Janeiro, 2008.

CAD/TQS, **Versão 21 Unipro 12,** 2019.

CARVALHO, R. C. **Estruturas em Concreto Protendido: Pré tração, Pós tração, Cálculo e Detalhamento.** 1ª Ed. São Paulo: PINI, 2012.

CARVALHO, R.S.; FIGUEIREDO FILHO, J.R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado.** 3ª Ed. São Carlos, EdUFSCar, 2007.

CAUDURO, E. L. **Manual para boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas.** Ed. 2, São Paulo, 2002.

CHOLFE, L.; BONILHA, L. **Concreto protendido: teoria e prática.** PINI, São Paulo, 2013.

GIFFHORN, G. C.; LAZZARI P. M. "**Estudo comparativo entre viga de concreto armado e concreto protendido**", Revista de Engenharia da Faculdade Salesiana nº 7, pp. 2-14, 2014.

RUDLOFF. Concreto Protendido. Catálogo. Rev. 6, 11/2015. Disponível em (02/03/2019): http://www.rudloff.com.br/downloads/catalogo_concreto_protendido_rev-06.pdf

VERÍSSIMO, G.S.; CÉSAR JR., K.M.L. **Concreto Protendido – Fundamentos Básicos.** Universidade Federal de Viçosa, Dep. de Engenharia Civil, Versão 04, Viçosa/MG, 1998.