

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O CONCRETO PROTENDIDO E O CONCRETO ARMADO NA ESTRUTURA DE UMA EDIFICAÇÃO

Alex de Sousa Ferreira

Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (Sousa.alex459@gmail.com)

Henrique Dias de São Boaventura

Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (hbboaventura88@gmail.com)

José Lucas Lopes Lobo

Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da UniEVANGÉLICA (luclobo321@gmail.com)

Aurélio Caetano Feliciano

Discente, Especialista em Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA (aureliocfeng@gmail.com)

RESUMO

Frente aos desafios contemporâneos que são impostos a engenharia civil, que incluem a construção de estruturas com vãos cada vez maiores e a necessidade de suportar esforços consideráveis, os engenheiros têm reconhecido a importância de estudar novas técnicas construtivas e aprimorar os materiais existentes. Tendo em vista a crescente utilização do concreto protendido no Brasil, este trabalho se propõe a apresentar um comparativo entre os sistemas construtivos em concreto armado e concreto protendido utilizando modelagem computacional para obter o comportamento mais preciso da estrutura como um todo. A estrutura em concreto protendido apresenta um desempenho global melhor, pois apresenta uma flecha 34% menor, no entanto quando se compara os quantitativos de insumos para as duas vigas o resultado é muito semelhante. A grande vantagem do concreto protendido se estabeleceu nos apoios, pois houve uma redução no consumo de aço, cerca de 40 % se comparado a viga em concreto armado. Diante das situações apresentadas, é responsabilidade do projetista e dos construtores escolher o sistema mais apropriado para cada obra. No entanto, para tomar a decisão mais acertada, é fundamental realizar uma análise minuciosa de ambos os sistemas, com acesso a dados como os fornecidos neste estudo, a fim de embasar a escolha.

PALAVRAS-CHAVE: concreto protendido; economia; construção civil; dimensionamento.

1 INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil tem crescido, o que aumenta a concorrência enfrentada pelos investidores, engenheiros e construtoras. Dessa forma existe uma demanda cada vez maior por chamar a atenção dos clientes com obras mais arrojadas e que atendam as expectativas e necessidades dos compradores. Nesse contexto surge a necessidade de desenvolver e aplicar novos métodos construtivos como o concreto protendido.

O concreto é um material muito utilizado na construção civil devido a possibilidade de modelá-lo de diversas formas diferentes e não exigir mão de obra altamente capacitada, outra vantagem é a durabilidade que é superior ao aço e madeira, pode-se citar também a sua alta resistência ao fogo e a esforços de compressão (CARVALHO, 2014).

De acordo com Warner (2022), a aplicação de uma carga externa em vigas ou lajes gera tensões de tração em regiões da peça estrutural, tensões essas que também podem ser geradas por recalque nas fundações e variação térmica. Devido à capacidade inferior do concreto a esforços de tração ele não pode ser utilizado sozinho em estruturas usuais onde existem diferentes tipos de solicitação e esforço. Dessa forma torna-se necessário a adição de outro material para combater esses esforços de tração, o mais utilizado é o aço que é posicionado estrategicamente onde existem tensões normais de tração.

Naaman (2004) considera a aplicação de tensões de compressão no concreto por meio da protensão um resultado natural, já que a resistência a tração do concreto é desprezada nos cálculos de estruturas. A tensão de compressão gerada pela protensão consegue combater a tração gerada pelos carregamentos externos o que torna o concreto apto a servir como material estrutural para muitas aplicações.

Segundo Bastos (2019) o concreto protendido, devido a utilização de materiais de alta resistência em sua composição, tal como concreto e aço somado com a capacidade de reduzir a tensão de tração na peça estrutural, possibilita as peças estruturais serem projetadas com altura menor do que se fosse em concreto armado. Ainda segundo o mesmo autor, o concreto protendido apresenta uma durabilidade elevada devido a viabilidade de eliminar as fissuras no concreto, isso o torna adequado para ser utilizado em ambientes de alta agressividade. A força cortante também é mais bem combatida por elementos em concreto protendido devido a inclinação do cabo na extremidade dos apoios, isso reduz as tensões de tração nas bielas e diminui a necessidade de estribos na peça estrutural.

O concreto protendido permite melhorar o comportamento da peça estrutural em situações de serviço, pois reduz a deformação sem a necessidade de elementos de grandes dimensões. A protensão também é utilizada para reforçar estruturas existentes, além de poder ser utilizada em elementos que não sejam de concreto tal como aço e até madeira (WARNER, 2022).

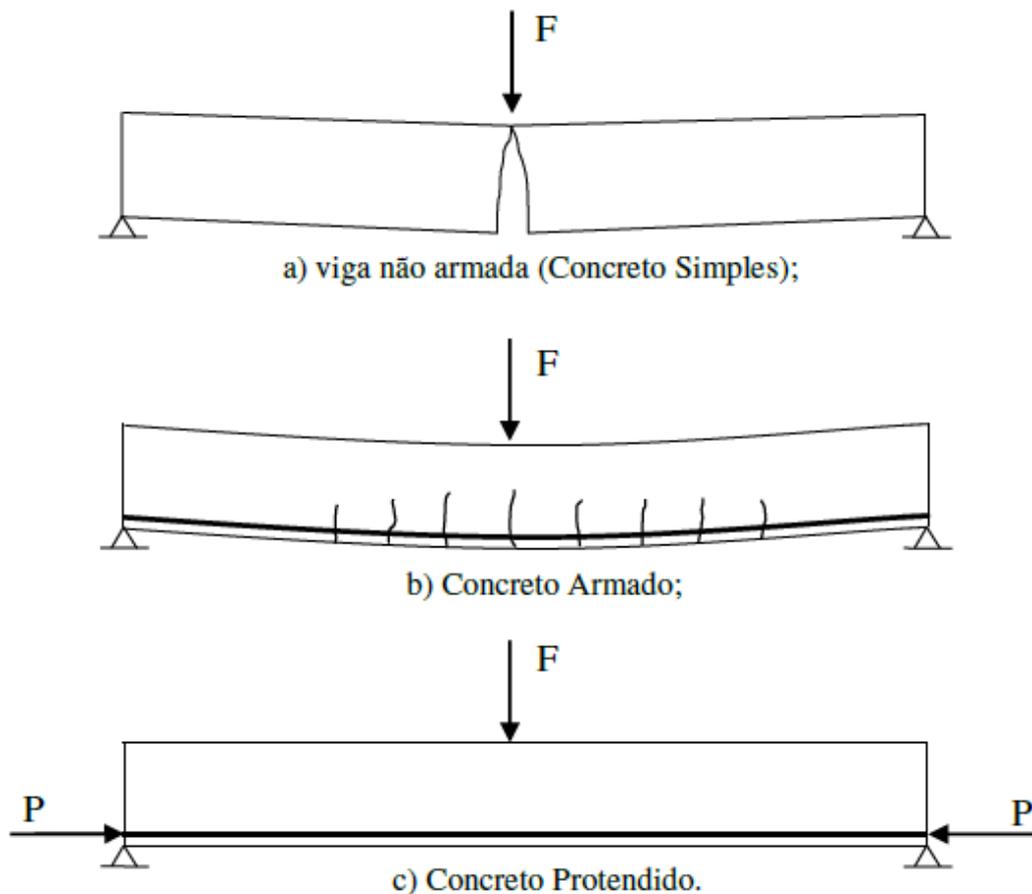
Este trabalho propõe uma análise, por meio do software TQS, do comportamento de uma viga em concreto armado e concreto protendido procurando evidenciar as vantagens e desvantagens dos dois sistemas como a deformação em situações de serviço, a seção dos elementos, o peso próprio e o custo de execução em um comparativo.

2 DEFINIÇÕES E CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO PROTENDIDO

2.1 DEFINIÇÃO DE CONCRETO PROTENDIDO

A NBR6118 (2014) define que a protensão ocorre quando parte da armadura é antecipadamente tensionada para, em condições de serviço, limitar ou eliminar a geração de fissuras, reduzir as deformações e utilizar de maneira mais eficiente os aços com alta tensão de escoamento no estado limite último. Esses efeitos da protensão podem ser visualizados na Figura 1.

Figura 1: Fissuração de uma viga



Fonte: (Bastos, 2019)

A armadura de protensão, que foi previamente alongada, recebe o nome de armadura ativa, pois ela trabalha independentemente de haver ou não carregamento na estrutura, por exemplo, mesmo que a peça estrutural esteja escorada essa armadura tensiona o elemento, portanto está sofrendo algum esforço, isso não ocorre em armaduras convencionais de concreto armado, essas só sofrem algum esforço quando o concreto fissa (CHUST, 2012).

De acordo com a NBR6118 (2014), armadura ativa pode ser composta de fios e cabos e é designada para a aplicação de um alongamento com o objetivo de gerar uma força de protensão.

Quanto as aplicações possíveis do concreto protendido vale citar estruturas de grande porte como pontes, plataformas de exploração de petróleo, torres de concreto. Em estruturas mais usuais o concreto protendido é muito utilizado em lajes lisas ou nervuradas e vigas de edifícios, especialmente se os projetos arquitetônicos exigirem grandes vãos livres. Outra forma comum de utilização do concreto protendido é em estruturas cilíndricas como silos e reservatórios, nesses casos a protensão é chamada de circular (VERÍSSIMO, 1998). A Figura 2 apresenta a montagem de uma viga faixa protendida utilizada juntamente com lajes nervuradas.

Figura 2: Cordoalhas engraxadas de uma viga faixa



Fonte: (Bastos, 2019)

A protensão se desenvolveu em conjunto com o concreto armado, no entanto as primeiras experiências depararam-se com um problema, a perda de protensão ao longo do tempo, o que impossibilitava a sua utilização, pois a força de protensão deixaria de existir. Isso veio a mudar com os estudos feitos por Eugene Freyssinet com início em 1928, esses estudos permitiram a percepção que seria necessário a utilização de aços que fossem capazes de aceitar grandes deformações sem sofrer fratura, dessa forma mesmo que parte do alongamento da armadura fosse perdida o concreto permaneceria comprimido. Para que esse aço possa atingir tais deformações sem perder a aderência com o concreto ele deve ser tensionado antes da concretagem ou com o auxílio de uma bainha que separe o concreto da armadura, dessa forma o concreto só entra em contato com a armadura após o alongamento dela. Isso permite ao aço atingir deformações superiores a 0,1%, que é o comum para estruturas de concreto armado convencionais para manter a aderência entre o concreto e a armadura passiva (CHUST, 2012).

2.1.1 CONCRETO PROTENDIDO SEM ADERÊNCIA

De acordo com a NBR 6118 (2023), o concreto protendido sem aderência é confeccionado com o tensionamento das armaduras de protensão após a cura do concreto, sendo que os apoios utilizados para fixar o aço de protensão ficam na própria estrutura, são chamados de ancoragens. Dessa forma o concreto e a armadura entram em contato direto apenas nas extremidades da peça, geralmente esse tipo de protensão é realizado utilizando cordoalha engraxada, como pode ser visto na figura 3.

Esse tipo de protensão é muito utilizado e difundida pela sua facilidade de ser executada e é muito empregada em projetos de lajes planas ou nervuradas em edifícios comerciais ou residenciais.

Figura 3: Cordoalha engraxada



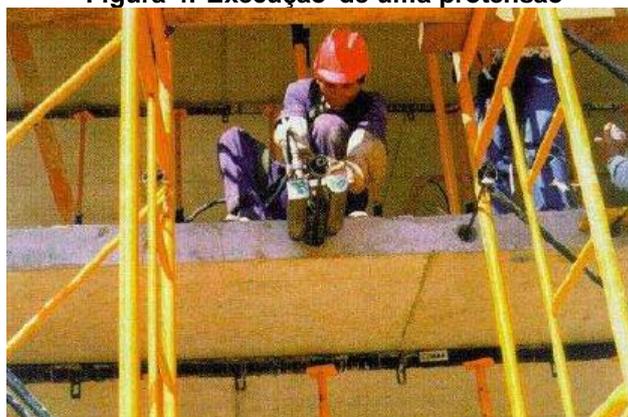
Fonte: (Bastos, 2019)

2.1.2 PROCESSO CONSTRUTIVO DO CONCRETO PROTENDIDO SEM ADERÊNCIA

Segundo Chust (2012), primeiro ocorre a montagem das formas com o escoramento, depois são introduzidas as armaduras passivas e a bainha contendo a armadura ativa, essa bainha impede que haja contato entre a armadura e o concreto.

O concreto é espalhado na forma ocorrendo a aderência apenas entre a armadura passiva e o concreto, pois a armadura ativa está isolada dentro bainha engraxada. Após o concreto atingir a resistência mínima exigida em projeto para a protensão, são introduzidos macacos hidráulicos na extremidade da peça com o objetivo de impor uma força de tração na armadura ativa provocando seu alongamento, o macaco se apoia nos limites da peça estrutural comprimindo a estrutura enquanto a armadura é distendida como ilustrado na figura 4.

Figura 4: Execução de uma protensão



Fonte: (Bastos, 2019)

2.1.3 ANCORAGEM DA ARMADURA ATIVA

Os cabos de protensão são capazes de gerar uma força considerável no concreto, essa tensão é transmitida ao elemento estrutural por meio das ancoragens nas extremidades da peça. A carga normal de compressão inicialmente se concentra em uma

pequena parte na extremidade da estrutura para depois se espalhar, como é um esforço considerável podem ocorrer fissuras ao longo da estrutura na vertical ou na horizontal, essas patologias são difíceis de remediar, dessa forma deve-se projetar, quando necessário, reforços estruturais para evitar esses problemas (WARNER, 2022).

Há muitas formas de se realizar a ancoragem de armaduras ativas para o concreto protendido com aderência posterior, desenvolvidas desde o século XX, mas geralmente se trata de cunhas que ficam dentro de cavidades cônicas de aço como ilustrado na Figura 5 (BASTOS, 2019).

Figura 5: Ancoragem para cordoalha engraxada



Fonte: (Bastos, 2019)

2.1.4 ESTADOS LIMITES DO CONCRETO PROTENDIDO

Conforme a NBR 6118 (2023) estruturas de concreto precisam se averiguadas em relação ao estado limite último (ELU) que é a pior situação possível, onde ocorre a ruína, e o estado limite de serviço (ELS) em que a estrutura é analisada em relação a durabilidade, aparência, boa utilização e conforto dos usuários.

Para o concreto protendido sem aderência os Estado-Limites de Serviço mais importantes são:

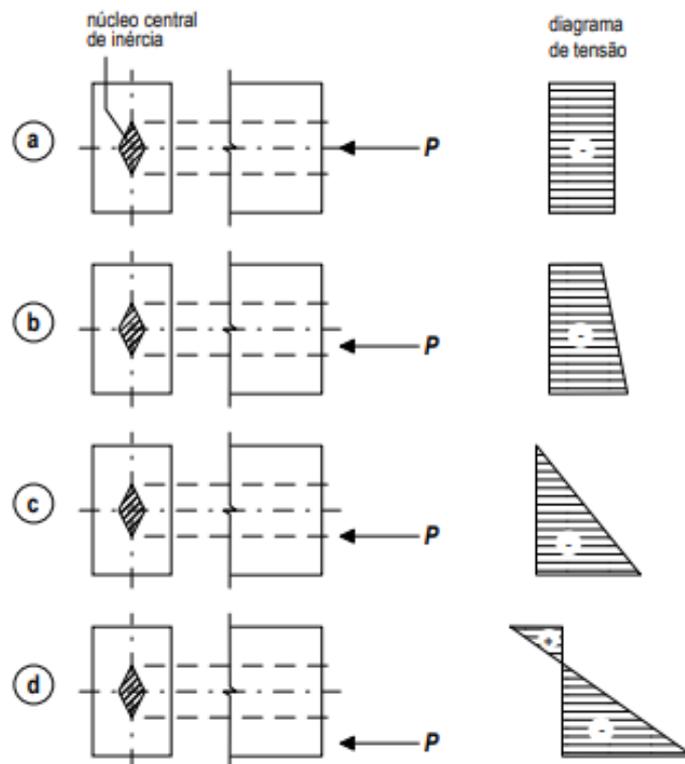
- Estado-Limite de Formação de Fissuras (ELS-F): nesse estado começa a aparecer fissuras na estrutura, isso ocorre quando a tensão atinge o $f_{ct,f}$ que é definido como o máximo que o concreto simples resiste a tração.
- Estado-Limite de Abertura de Fissuras (ELS-W): esse é o estado onde as fissuras exibem aberturas iguais ou superiores ao indicado em norma, em relação ao concreto protendido as fissuras não podem ultrapassar 0,2mm de abertura máxima.
- Estado-Limite de Deformações Excessivas (ELS-DEF): esse estado estabelece parâmetros quanto a flecha aceitável em vigas e lajes para evitar afetar negativamente a estética ou causar insegurança nos usuários
- Estado-Limite de Descompressão (ELS-D): Estado no qual não existe tensão de tração no elemento estrutural, ocorre quando um elemento protendido recebe um carregamento exterior a estrutura que provoca a descompressão da seção anulando as tensões binarias existentes na peça fletida.

- Estado-Limite de Descompressão Parcial (ELS-DP): nesse estado a compressão é assegurada na área das armaduras de protensão em comparação a seção transversal.
- Estado-Limite de Compressão Excessiva (ELS-CE): estado onde as tensões de compressão se encontram em um limite, esse esforço pode causar falha no concreto por abrir microfissuras e acentuar seu tamanho, em concreto protendido, por esse motivo, as tensões de compressão podem chegar apenas a 50% ou 60% da resistência a compressão simples do concreto.

2.1.5 TRAÇADO DO CABO

Segundo Veríssimo (1998), o traçado do cabo influencia no comportamento da peça estrutural, se o cabo for posicionado no núcleo central de inércia as tensões de compressão ao longo do elemento são retilíneas, conforme o cabo é colocado excêntrico a esse núcleo se incrementa a tensão de compressão em um extremo e se reduz no outro, podendo gerar tração no extremo oposto ao da compressão como pode ser visto na Figura 6, tudo isso deve ser previsto em projeto.

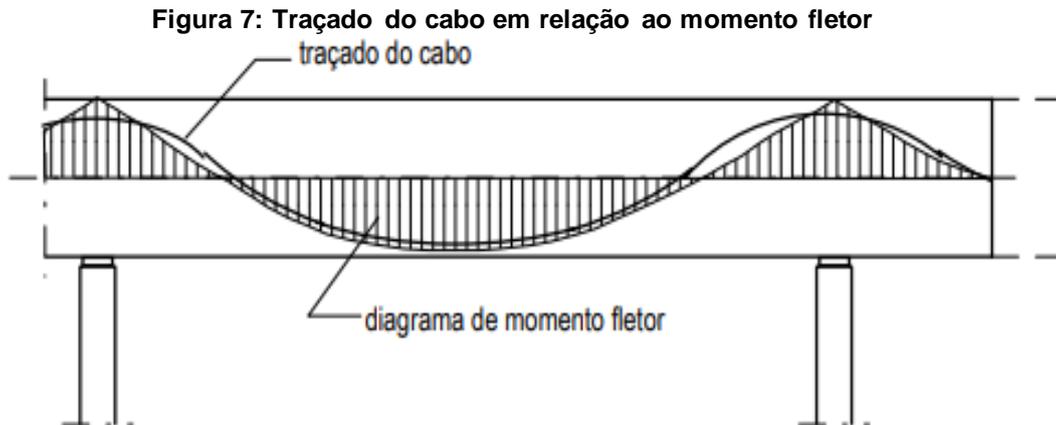
Figura 6: Tensões internas de uma viga em função da posição do cabo



Fonte: (VERÍSSIMO, 1998)

A maneira mais eficiente de se protender uma peça é quando as tensões de protensão acompanham as tensões geradas pelo carregamento externo como pode ser visto na Figura 7, onde os esforços causados pela protensão seguem o diagrama de momento fletor do componente estrutural, esse sistema só é possível no concreto

protendido com aderência posterior ou sem aderência por questões executivas, pois o perfil do cabo pode ser variável, geralmente uma parábola (VERÍSSIMO, 1998).



Fonte: (VERÍSSIMO, 1998)

2.1.6 PRINCIPAIS PERDAS DE PROTENSÃO PARA CONCRETO PROTENDIDO SEM ADERÊNCIA

De acordo com a NBR6118 (2014), as perdas de protensão podem ser classificadas em diferidas e imediatas, sendo as perdas imediatas causadas principalmente pela forma com que a protensão é executada, as perdas diferidas ocorrem devido a fluência do concreto e a relaxação do aço em um determinado período após a protensão. As principais causas são:

- Perdas imediatas: no concreto protendido sem aderência essas perdas ocorrem devido a diminuição da seção longitudinal imediato da estrutura quando exposta ao esforço de protensão, a fricção entre a armadura ativa e a bainha no ato da protensão e ao escorregamento da armadura dos pontos de ancoragem até a acomodação completa.
- Perdas progressivas: causada pela relaxação do aço, pois quando este está submetido a um estiramento sofre, ao longo do tempo, por um efeito chamado relaxação, que ocasiona no alongamento natural do aço, portanto gera perdas na força de protensão, o concreto também pode sofrer variações dimensionais devido a fluência e a retração, esses efeitos podem gerar o encurtamento da peça estrutural e conseqüente perda de protensão (NBR 6118, 2014)

3 NÍVEIS DE PROTENSÃO

De acordo com Bastos (2019), a aplicação da força de protensão, conhecida como tensão na armadura ativa, é influenciada por diversos fatores, sendo os mais cruciais: as dimensões da estrutura, a carga imposta sobre o elemento, a agressividade ambiental e as condições as quais a estrutura estará exposta durante sua utilização. A agressividade do ambiente desempenha um papel essencial no que diz respeito à abertura de fissuras,

especialmente em ambientes extremamente hostis. Em tais cenários, a abordagem recomendada é a adoção da protensão completa, com o intuito de neutralizar as forças de tração e, conseqüentemente, prevenir a formação de fissuras, proporcionando uma proteção mais eficaz à armadura. O Quadro 1 apresenta a classificação determinada pela norma quanto a classe de agressividade ambiental em função do local da construção da estrutura.

QUADRO 1: CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a Industrial ^{a, b}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c} Respingos de maré	Elevado

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).
^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.
^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR6118 (2014)

A utilização da protensão completa acarreta custos substanciais, uma vez que demanda a aplicação de forças de grande magnitude nas armaduras. Esse nível de tensão aplicada pode resultar em uma contraflecha significativa, a qual pode aumentar ao longo do tempo devido à fluência do concreto. Além disso, há o risco de ruptura súbita do elemento estrutural quando submetido a cargas imprevistas, sem aviso prévio (CHOLFE, 2013).

Para evitar tais desafios, especialmente em ambientes de baixa agressividade, uma alternativa é adotar a protensão parcial. Nesse caso, é permitida a abertura controlada de fissuras, com uma amplitude de até 2mm, em conformidade com a NBR6118 (2014) como pode ser visualizado no Quadro 2. A protensão parcial não elimina completamente o esforço de tração no elemento estrutural, requerendo a inclusão de armadura passiva, semelhante ao que é feito em vigas de concreto convencionais, para conter a abertura das fissuras. Apesar da ocorrência de fissuras limitadas, esses elementos mantêm uma rigidez à flexão superior à de vigas de concreto armado convencionais, exibindo deslocamentos e deformações de pequena magnitude (BASTOS, 2018).

Seguindo a orientação de Chust (2012), a escolha do nível de protensão adequado pode ser guiada da seguinte forma: em elementos com aderência posterior, em condições

ambientais de agressividade fraca e moderada, a protensão parcial é apropriada, enquanto em ambientes altamente agressivos, recomenda-se a protensão limitada. Para elementos com protensão de aderência inicial, em ambientes com classe de agressividade fraca, a protensão parcial é indicada, em ambientes de classe de agressividade moderada, a protensão limitada é preferível, e em ambientes altamente agressivos, a protensão completa é a opção recomendada. O Quadro 2 apresenta a abertura de fissura máxima permitida em função da classe de agressividade do ambiente e ao tipo de sistema estrutural.

QUADRO 2: EXIGÊNCIAS DE DURABILIDADE

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ^a	Combinação frequente

^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm (Figura 3.1).

NOTAS

1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.

2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

Fonte: NBR6118 (2014)

4 AÇOS UTILIZADOS EM CONCRETO PROTENDIDO SEM ADERENCIA

A NBR 7483 (2021) estabelece as diretrizes para a fabricação de cordoalhas de aço de alta resistência com três e sete fios, que podem ser tanto engraxadas quanto não engraxadas. Esta norma abrange cordoalhas com diâmetros de 9,5 mm, 12,7 mm e 15,2 mm, e define duas categorias principais, CP-190 e CP-210, onde os números indicam a resistência característica à tração em kN/cm², sendo CP uma sigla para concreto protendido.

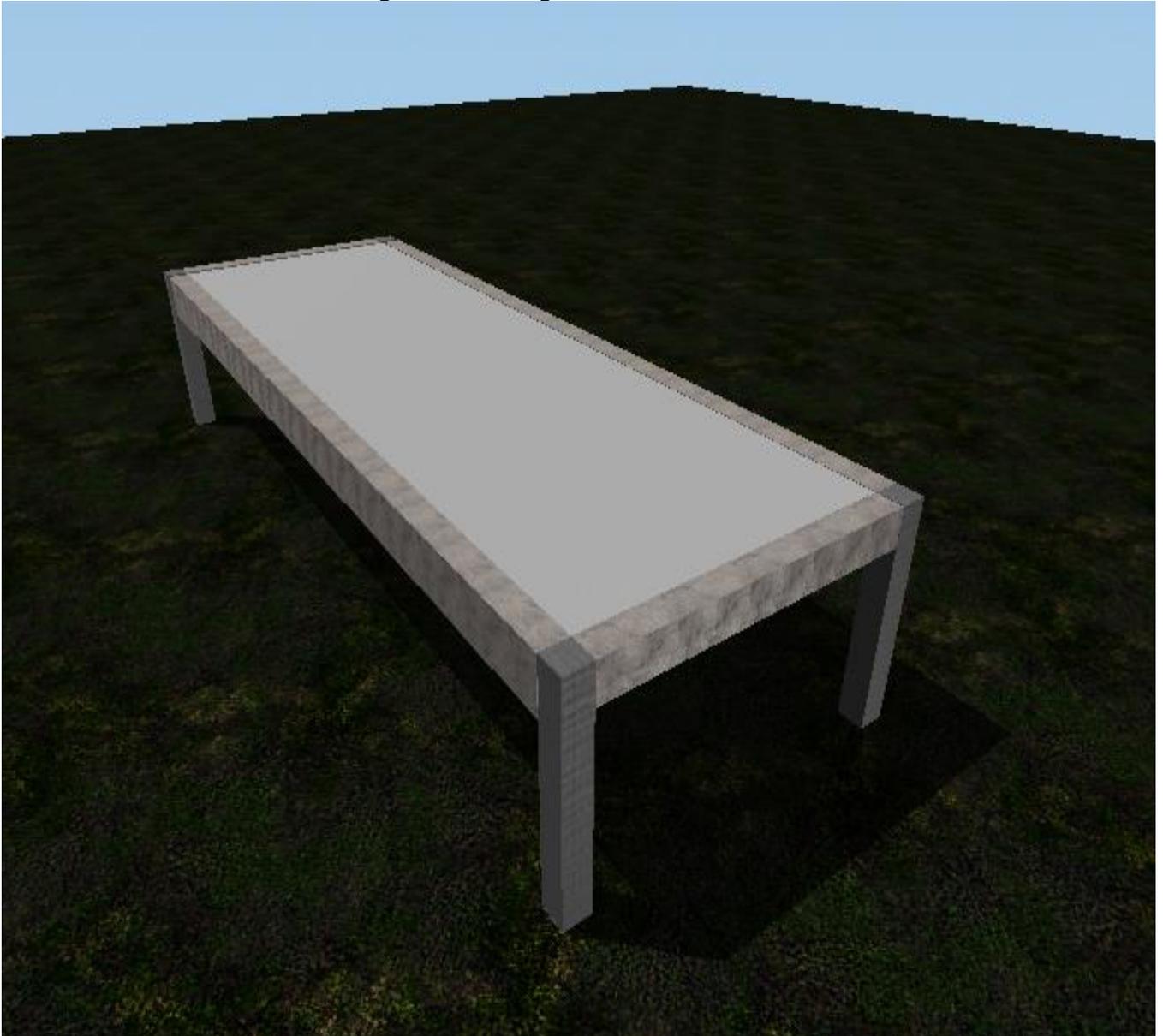
5 ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso é um comparativo entre dois sistemas construtivos, o concreto armado e o concreto protendido com o intuito de comparar a eficiência dos dois sistemas em relação ao consumo de aço e de concreto, Estado Limite de Serviço (ELS) e

Estado Limite Último (ELU), além de demonstrar algumas particularidades dos dois sistemas em relação ao dimensionamento.

O modelo apresentado consiste em um sistema simples de quatro pilares e quatro vigas, conforme apresentado na Figura 8, sendo que duas vigas apresentam um comprimento elevado de vão em relação ao especificado na literatura para concreto armado com vãos entre 3 e 8 m para um bom dimensionamento visando a economia.

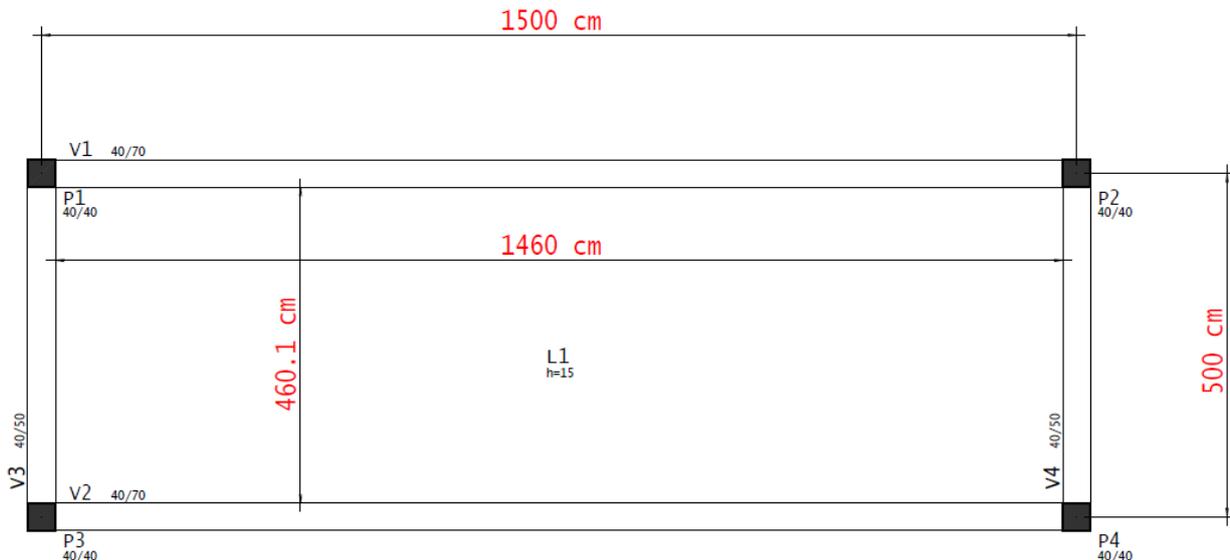
Figura 8: Modelagem 3d da estrutura



Fonte: (AUTORES, 2023)

5.1 PARÂMETROS DE CÁLCULO

Figura 9: Dimensões da estrutura em planta



Fonte: (AUTORES, 2023)

Para a realização do comparativo a viga V1 e V2, que são idênticas, foram dimensionadas para resistir aos esforços solicitantes utilizando o concreto armado como sistema estrutural, também foi dimensionado em concreto protendido seguindo o mesmo modelo para que seja possível realizar o comparativo da maneira mais eficiente possível possibilitando comparar a eficiência dos dois sistemas para superar os mesmos vãos, o dimensionamento foi feito de acordo com o que é solicitado pela norma NBR6118 (2014).

Para este modelo a carga da laje é de 150 kg de carga acidental e 150kg de carga permanente, a laje possui largura de 4,60 m por 14,60 m de comprimento e dispõe da espessura de 15cm. Os pilares têm as dimensões de 40 cm por 40 cm, as vigas possuem seção de 40 cm de largura por 70 cm de altura tanto para a obra em concreto protendido quanto para a obra em concreto armado convencional e a distância entre o topo da viga superior até a base dos pilares é de 3 m, valor comum para obras de concreto armado.

5.2 O SOFTWARE PARA MODELAGEM

Os modelos foram feitos utilizando um software de cálculo estrutural com o objetivo de apresentar um cálculo mais preciso e os efeitos da protensão no pórtico espacial como um todo. Para este estudo foi utilizado a versão acadêmica do TQS, que é um software brasileiro utilizado para o dimensionamento de estruturas de grande ou pequeno porte em concreto armado ou protendido.

5.3 CÁLCULO DAS VIGAS EM CONCRETO ARMADO

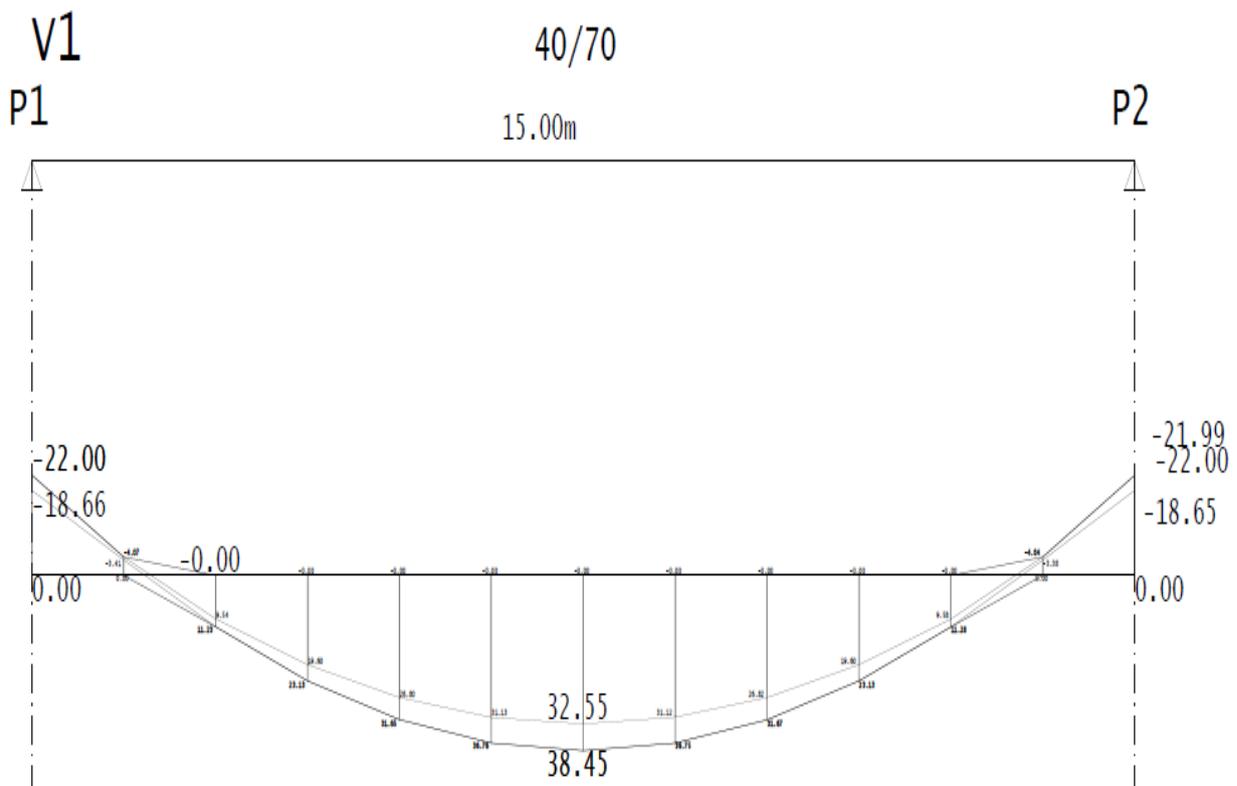
Para o cálculo da viga em concreto armado foi utilizado como f_{ck} para o concreto 40 MPa as armaduras são de CA-50, o cobrimento nominal das armaduras é de 3 cm para as vigas e 2,5 cm para as lajes, as vigas principais possuem um vão de 15 m de eixo a eixo

dos apoios sendo que a viga possui seção transversal de 70 cm de altura por 40 cm de largura, as cargas consideradas sobre a laje são de 150 kgf/m² de carga permanente e 150kgf/m² de carga acidental. As lajes possuem dimensões de 4,60 m por 14,60 m, sendo que sua espessura é de 15 cm, a laje é classificada como maciça.

O esforço principal a ser considerado em uma viga é a flexão, trata-se de um esforço binário de tração combinado com compressão. Esse esforço gera tensões opostas ao longo da seção transversal da viga. No caso do concreto armado quem resiste a tração é o aço e o concreto é responsável pela resistência a compressão. Nessa situação o cálculo não considera a resistência do concreto a tração, embora ela exista para efeitos de cálculo ela é nula.

O dimensionamento das vigas principais em concreto armado para o esforço de flexão originou-se de um diagrama de momento fletor gerado pelos carregamentos como pode ser visto na Figura 10. De acordo com esses diagramas o momento positivo máximo é de 38,45 tf.m, esse esforço, para ser resistido, necessita de uma área de aço de armadura passiva positiva de 20,36cm² que pode ser atendido por 7 barras de CA-50 de 20mm. O momento negativo máximo é de 25,56 tf.m, esse momento precisa de uma armadura de 11,15 cm² que pode ser satisfeito por 6 vergalhões de CA-50 de 16mm.

Figura 10: Diagrama de momento fletor da viga em concreto armado



Fonte: (AUTORES, 2023)

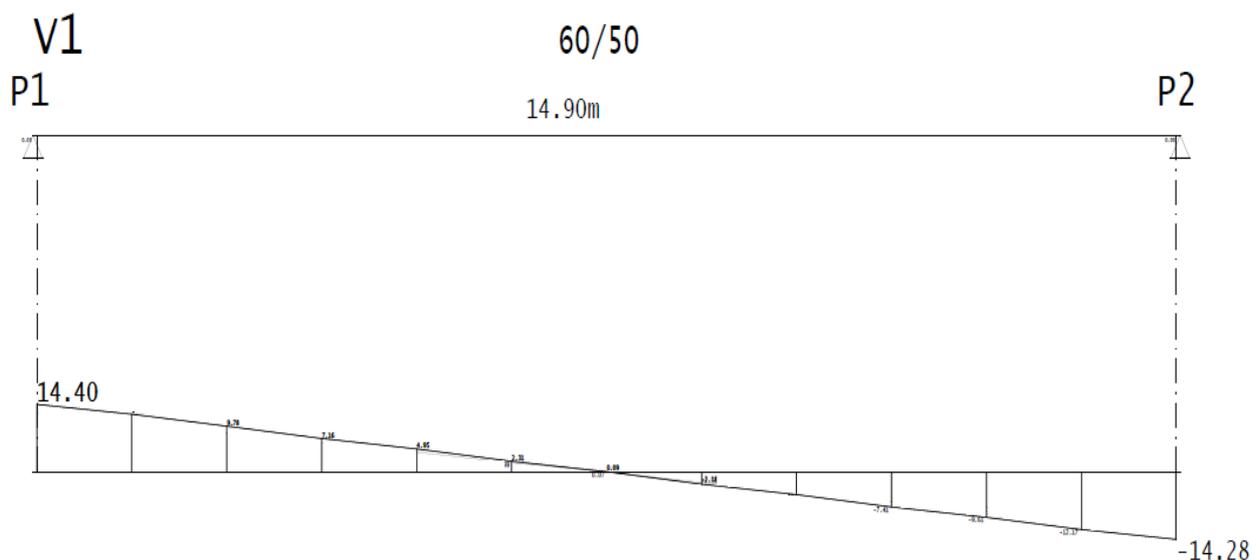
A flecha das vigas principais foi calculada em 2,45 cm para a situação de combinação quase permanente, que considera apenas 30% da carga acidental presente

nas lajes e vigas. Para atender os critérios da norma NBR6118 (2014) a flecha limite é 6 cm calculada pela expressão $L/250$ onde L é o vão medido de eixo a eixo dos pilares, portanto essa viga estaria satisfazendo os critérios estabelecidos em norma para o Estado Limite De Serviço (ELS).

O esforço cortante é a tendencia de cisalhamento da viga e é calculado tendo como base a treliça de Morsch. Esse método permite determinar a quantidade de armadura transversal necessária para resistir a tração gerada pelo carregamento. Esse método simplifica a viga tornando-a semelhante a uma treliça para a simplificação dos cálculos. Um cálculo mais preciso da viga depende de métodos computacionais, como os elementos finitos.

O carregamento presente nas vigas gerou o diagrama de esforço cortante que pode ser visto na Figura 11, de acordo com ele a cortante máxima é de 14,40 tf. Esse esforço é resistido pelos estribos, armadura transversal. Para esta viga a área de aço calculada de estribos foi de $5,41 \text{ cm}^2/\text{m}$, isso pode ser convertido para estribos de 4 ramos de 6,3 a cada 22cm de viga. O total de estribos usados nessa viga seria de 67 unidades seguindo esse espaçamento.

Figura 11: Diagrama de esforço cortante da viga em concreto armado

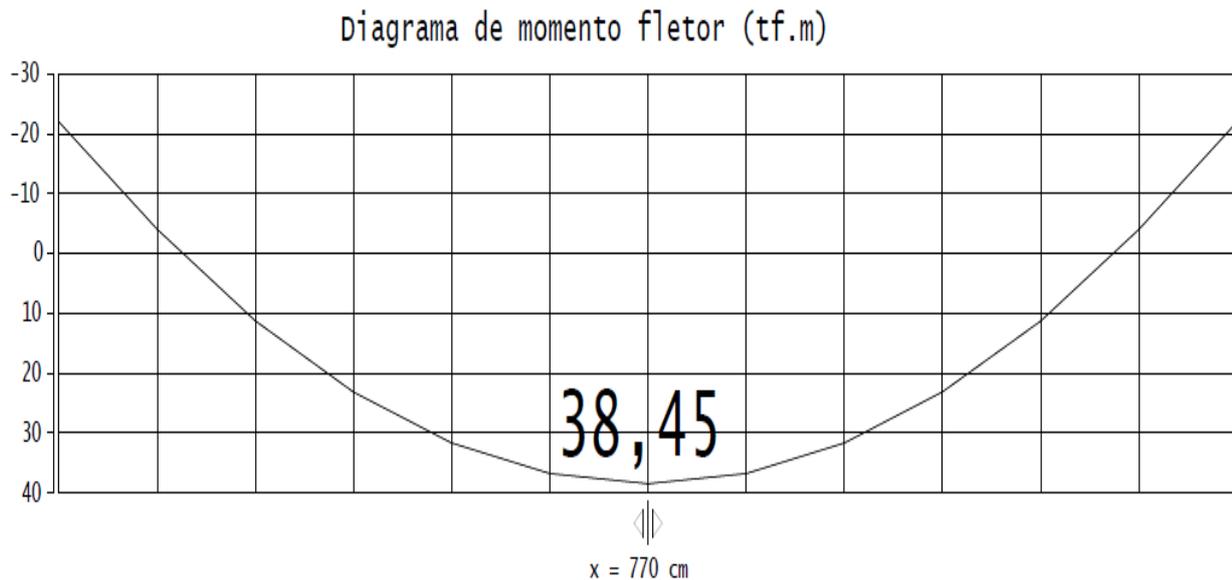


Fonte: (AUTORES, 2023)

5.4 CÁLCULO DAS VIGAS PROTENDIDAS

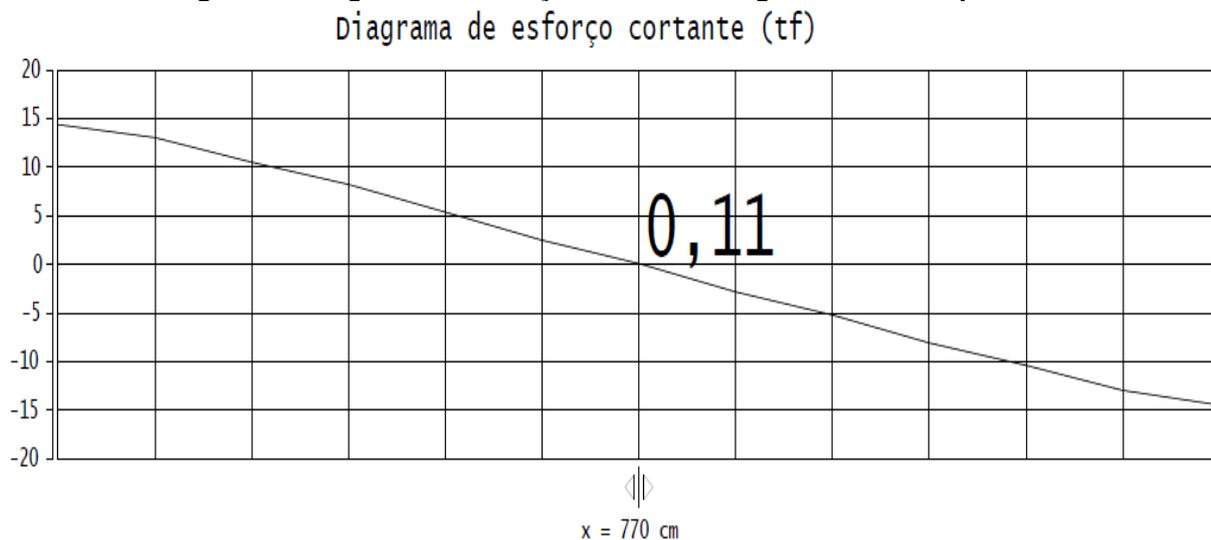
Para o cálculo da armadura ativa e passiva da viga protendida foi considerado e, para a combinação de peso próprio mais a carga permanente mais a sobrecarga, o seguinte diagrama de momento fletor e cortante máximos apresentado na Figura 12 e Figura 13.

Figura 12: Diagrama de momento fletor da viga em concreto protendido



Fonte: (AUTORES, 2023)

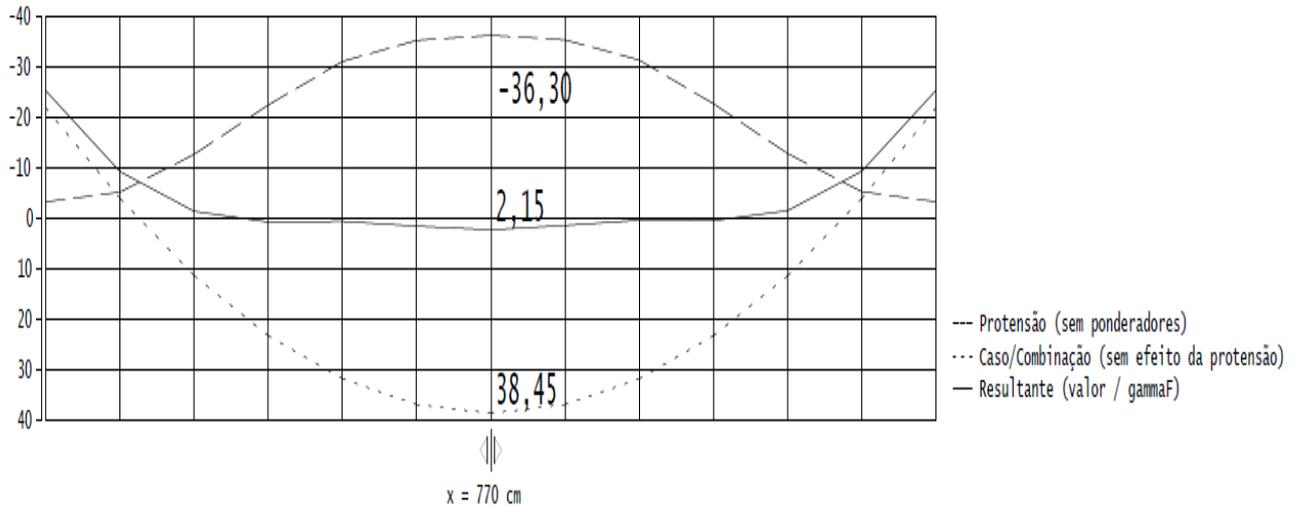
Figura 13: Diagrama de esforço cortante da viga em concreto protendido



Fonte: (AUTORES, 2023)

O dimensionamento foi feito considerando protensão limitada, isto é, a protensão não elimina completamente os esforços de tração da peça e foi considerado no cálculo que a protensão será executada apenas quando o concreto estiver com 100% do f_{ck} estipulado em projeto, após 28 dias da concretagem. Para obter os resultados e verificar o efeito da protensão nos esforços solicitantes brutos o software apresenta os diagramas de momento fletor causados pelas cargas externas e o diagrama de momento fletor gerados pela protensão. Esses dois esforços se equilibram para aliviar momento, no entanto é considerado apenas a viga isoladamente, sem os outros elementos estruturais como pode ser visto na Figura 14, portanto é necessário outro cálculo mais preciso onde a estrutura como um todo é analisada que será apresentado posteriormente.

Figura 14: Diagrama de momento fletor da viga protendida combinada com os esforços de protensão
Diagrama de momento fletor (tf.m)

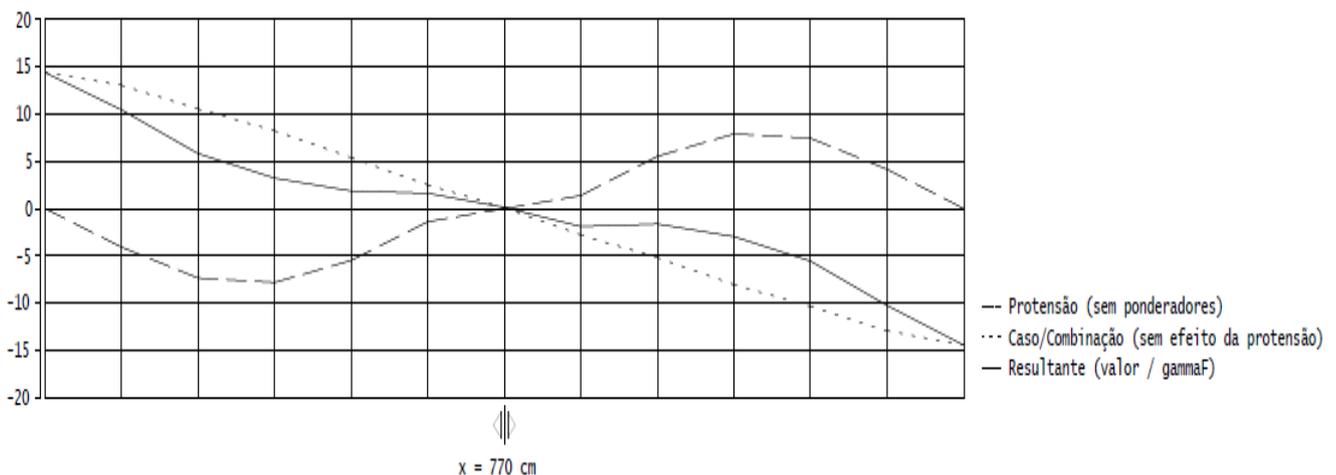


Fonte: (AUTORES, 2023)

O esforço de momento fletor máximo 38,45 tf.m é equilibrado por um momento de -36,30 tf.m em sentido contrário causado pela protensão, o somatório dessas cargas resulta em um momento de 2,15 tf.m. Dessa forma existe ainda um pequeno esforço de momento que precisa ser combatido ou pelo concreto ou com a colocação de armadura passiva ao longo da peça. A flecha calculada pelo software para essas condições de esforço e aliviada pela protensão foi de 1,60 cm, pela norma NBR 6118 (2014), essa flecha poderia ser de até 5,92 cm, portanto está dentro do estabelecido.

O esforço cortante também é afetado pela protensão, da mesma forma que no momento fletor existe um equilíbrio causado pela armadura ativa em relação ao esforço solicitante como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15: Diagrama de esforço cortante resultante após a protensão
Diagrama de esforço cortante (tf)

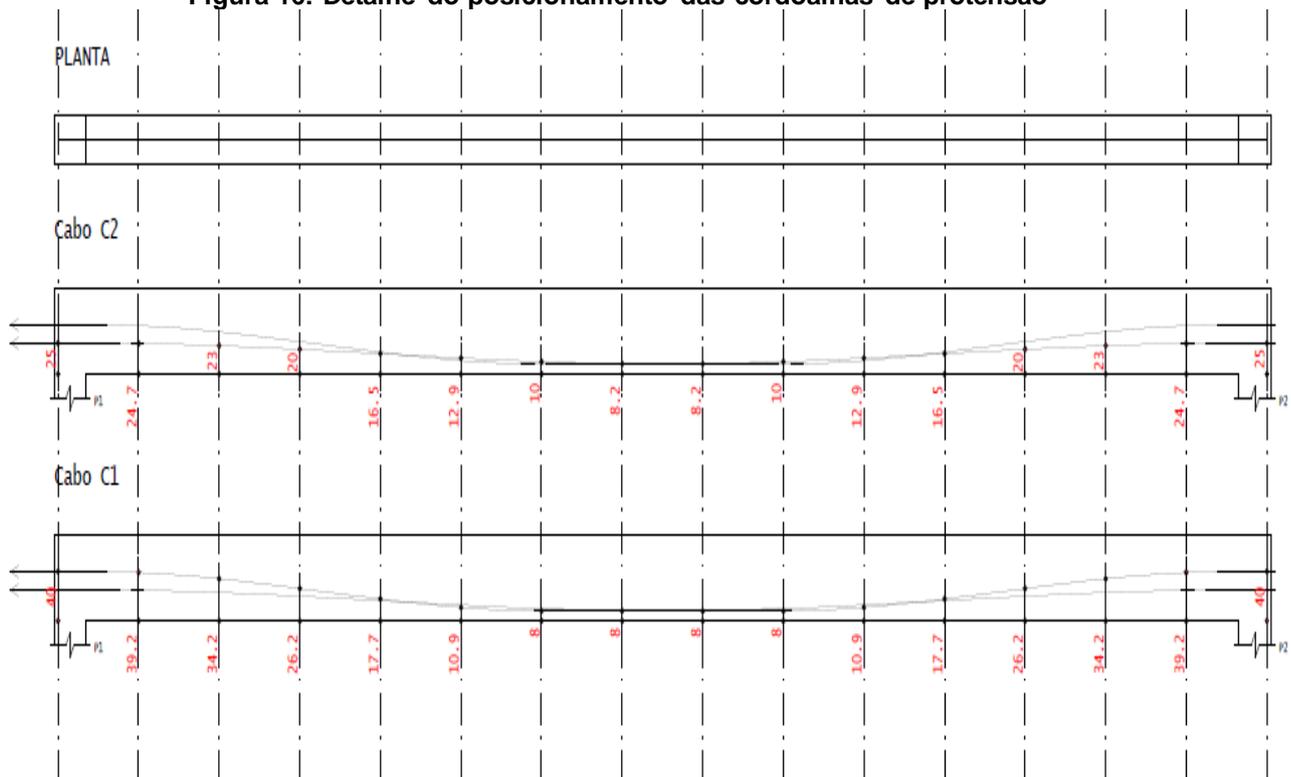


Fonte: (AUTORES, 2023)

A cortante máxima é de 15 tf, a área de aço calculada para esse esforço é de 5,61 cm²/m que pode ser atendido por estribos de 4 ramos de CA-50 de 6,3 mm a cada 22 cm de viga. A protensão também possui o efeito de reduzir as fissuras causadas pela cortante devido a armadura ser posicionada na diagonal, exatamente no ponto de cortante máxima, dessa forma pode existir uma redução na necessidade de armadura transversal.

Para que a viga atendesse aos critérios de Estado Limite de Abertura de fissuras (ELS-F), Estado Limite de Descompressão (ELS-D) e Estado Limite Último no ato da protensão (ELU-ATO) foi necessário a colocação de 8 cordoalhas de 15,2mm² separadas em dois feixes de 4 cordoalhas. O traçado pode ser visto na Figura 16, o ponto máximo inferior onde o cabo passa fica a 8,2 cm de distância da face inferior da viga para obedecer ao cobrimento de 3 cm e permitir a alocação das armaduras passivas. Os feixes de cabos estão distantes 15 cm um do outro nas extremidades para a colocação das ancoragens. O cabo C1 possui uma distância de 40 cm da face inferior da viga enquanto o feixe C2 está a 25 cm.

Figura 16: Detalhe do posicionamento das cordoalhas de protensão

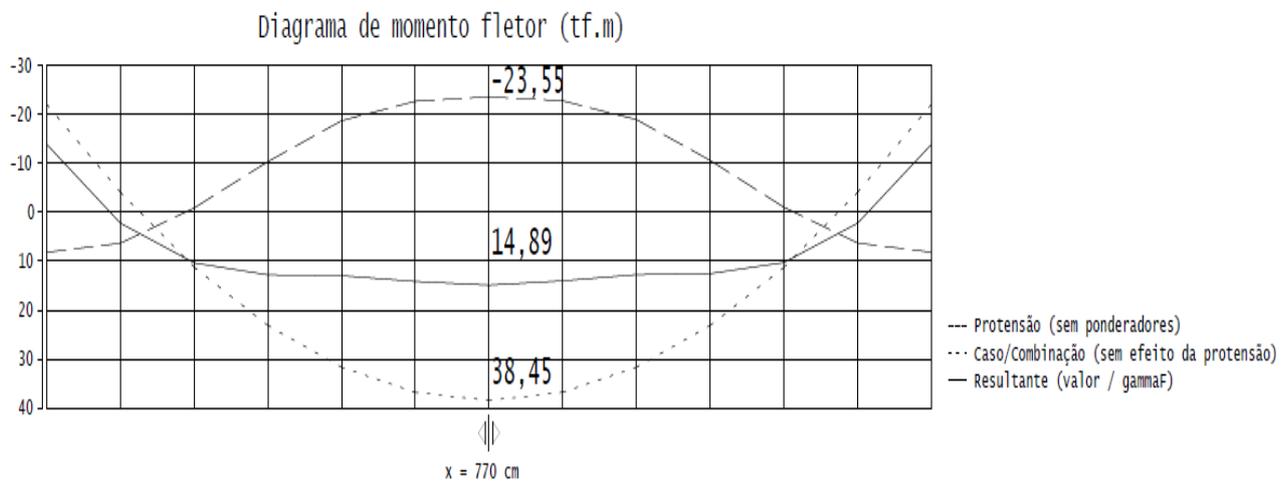


Fonte: (AUTORES, 2023)

Como foi dito anteriormente o diagrama de momento apresentado considerava a viga isoladamente, portanto foi necessário outro cálculo feito pelo software considerando os efeitos da protensão no pórtico hiperestático. Para isso foi realizado um processamento considerando toda a estrutura e rigidez dos elementos ligados a viga protendida para a

retirada dos esforços e obtenção de um resultado mais precisos e próximos ao que realmente ocorre na realidade.

Figura 17: Diagrama de momento fletor considerando a obra como um todo



Fonte: (AUTORES, 2023)

A Figura 17 mostra que, quando o resultado da protensão é processado considerando a estrutura como um todo, os resultados são um pouco diferentes do apresentado anteriormente, pois o momento gerado pela protensão é menor devido a presença de outros elementos estruturais como os pilares que absorvem parte da carga intensificando o momento positivo resultante e aliviando o negativo. Esse efeito não é considerado no isostático de protensão que foi apresentado anteriormente. Os resultados completos do dimensionamento para a armadura inferior podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Tabela de dimensionamento

Armadura inferior									
x (cm)	bw (cm)	d (cm)	bf (cm)	hf (cm)	Msd (tf.m)	As (cm ²)	As' (cm ²)	xLN (cm)	Mrd (tf.m)
20	40	65	0	0	0	0	0	25,3	41,73
145	40	65	0	0	6,63	0	0	24,9	43,83
270	40	65	0	0	29,96	0	0	23,4	51,65
395	40	65	0	0	47,02	0	0	21,6	61,89
520	40	65	0	0	59,3	0	0	19,3	70,96
645	40	65	0	0	66,69	0	0	18,5	75,33
770	40	65	0	0	69,12	0	0	18,5	76,38
895	40	65	0	0	66,67	0	0	18,6	75,5
1020	40	65	0	0	59,36	0	0	19,4	71,39
1145	40	65	0	0	47,03	0	0	21,9	62,43
1270	40	65	0	0	30,08	0	0	23,8	51,18
1395	40	65	0	0	6,67	0	0	25,4	44,39
1520	40	65	0	0	0	0	0	25,8	42,4

Fonte: (AUTORES, 2023)

O cálculo da armadura passiva leva em consideração o momento resistente da viga (Mrd) considerando apenas a protensão, nesse caso ele é superior aos momentos solicitantes (Msd) portanto, a viga não necessita da presença de aço passivo, no entanto ela ainda deve, por norma, obedecer ao parâmetro de armadura mínima, que nessa viga foi calculado em 4,2 cm² podendo ser atendido por 6 barras de CA-50 de 10mm. O mesmo ocorre para a área de aço superior que também não precisa de armadura passiva devendo apenas atender aos critérios de armadura mínima.

A viga também precisa corresponder aos critérios de armadura de pele, definidos pela norma NBR 6118 (2023), que são aplicáveis para vigas com altura superior a 60 cm. Dessa forma foi colocado 6 barras de CA-50 de 12,5 mm.

A armadura de fretagem tem como função evitar o espraçamento do concreto em função da carga aplicada pela protensão, para uma força total de protensão de 168 tf foi calculada uma área de aço de 11,09 cm² que pode ser convertido em 6 estribos de 8mm com 4 ramos para ser alocado em cada uma das ancoragens da viga protendida.

6 RESULTADOS

Os resultados do dimensionamento apresentaram consumo de insumos distintos para os dois sistemas estruturais. Foi feito um quantitativo de materiais relacionando a quantidade de aço necessária para as duas vigas, também foi quantificado o consumo de aço para a construção dos pilares, pois são elementos importantes no controle de flechas e sofrem variação de acordo com a rigidez das vigas.

Tabela 2: Quantitativo de aço para as vigas

Quantitativo de aço		
Armadura	Viga protendida	Viga em concreto armado
Aço CA-50, 6,3 mm (kg)	75	74
Aço CA-50, 8 mm (kg)	900	NA
Aço CA-50, 10 mm (kg)	72	NA
Aço CA-50, 12,5 mm (kg)	91	91
Aço CA-50, 16 mm (kg)	NA	60
Aço CA-50, 20 mm (kg)	NA	248
Aço CP-190 15,2 mm (kg)	159	NA

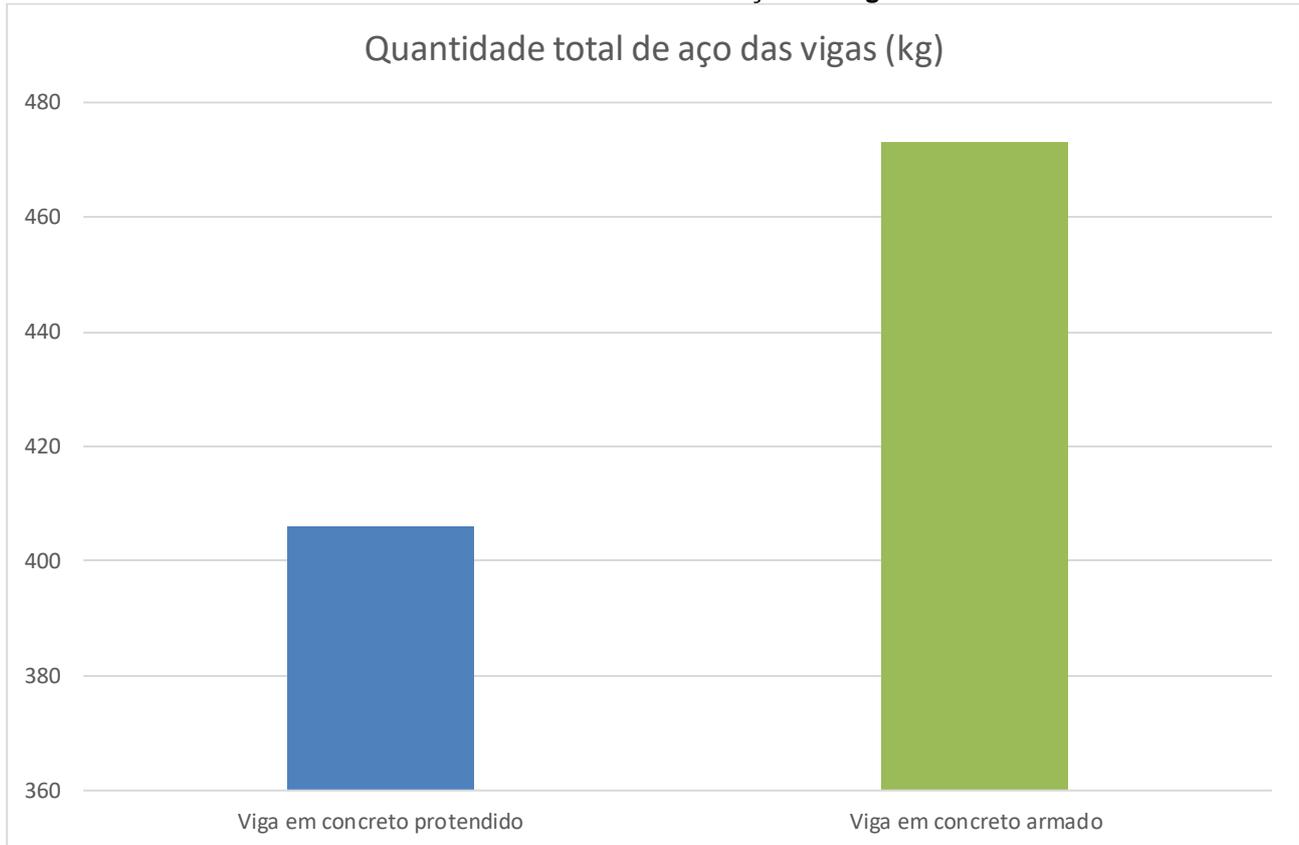
Fonte: (AUTORES, 2023)

Tabela 3: Resumo de materiais

Armadura	Viga protendida	Viga em concreto armado
Aço CA-50 armadura longitudinal (kg)	163	399
Aço CA-50 armadura transversal (kg)	75	74
Armadura de fretagem (kg)	9	NA
Aço CP-190 (kg)	159	NA
Concreto C40 (m ³)	4,08	4,08

Fonte: (AUTORES, 2023)

Gráfico 1: Quantitativo de aço nas vigas



Fonte: (AUTORES, 2023)

A Tabela 3 demonstra que houve uma redução de 236 kg na quantidade de aço utilizado como armadura passiva na viga protendida quando comparada a viga em concreto armado convencional, isso corresponde a 59% de economia e está de acordo com o que as referências bibliográficas e outros estudos sugerem. Quando se compara o total de aço utilizado, a diferença é de 76 kg a menos na viga protendida.

Outro comparativo importante é em relação a flecha dessas duas vigas em situação de serviço, para a viga em concreto armado convencional, o deslocamento foi de 2,45 cm e da viga em concreto protendido foi de 1,60 cm, correspondendo a uma diferença de 85 mm ou 34% de redução no elemento protendido. Dessa forma pode-se concluir que a viga protendida possui uma rigidez superior a viga em concreto armado quanto aos esforços de flexão e, por deformar menos, tem uma durabilidade maior já que as fissuras são menores e controladas. A rigidez superior da viga protendida pode ser explicada pela contra flecha gerada pela força de protensão e pela compressão imposta a seção.

Como a cortante é a mesma para os dois elementos e a protensão interfere pouco nesse esforço não existiu diferença significativa entre os dois sistemas construtivos, cerca de 1 kg de armadura transversal a mais na viga protendida. No entanto para a viga protendida deve-se considerar a armadura de fretagem que acrescenta 9 kg ao peso total de aço dessa viga. As dimensões das duas vigas para os dois sistemas é a mesma, portanto o volume de concreto é exatamente o mesmo, cerca de 4,08 m³

Outro elemento importante para o comparativo são os pilares como pode ser visualizado na Tabela 5.

Tabela 4: Quantitativo de aço para os pilares em kg

Armadura	Pilares de apoio da viga em concreto protendido (P1 E P2)	Pilares de apoio da viga em concreto armado (P1 E P2)
Aço CA-60, 5,0 mm (kg)	24	35
Aço CA-50, 25 mm (kg)	299	499

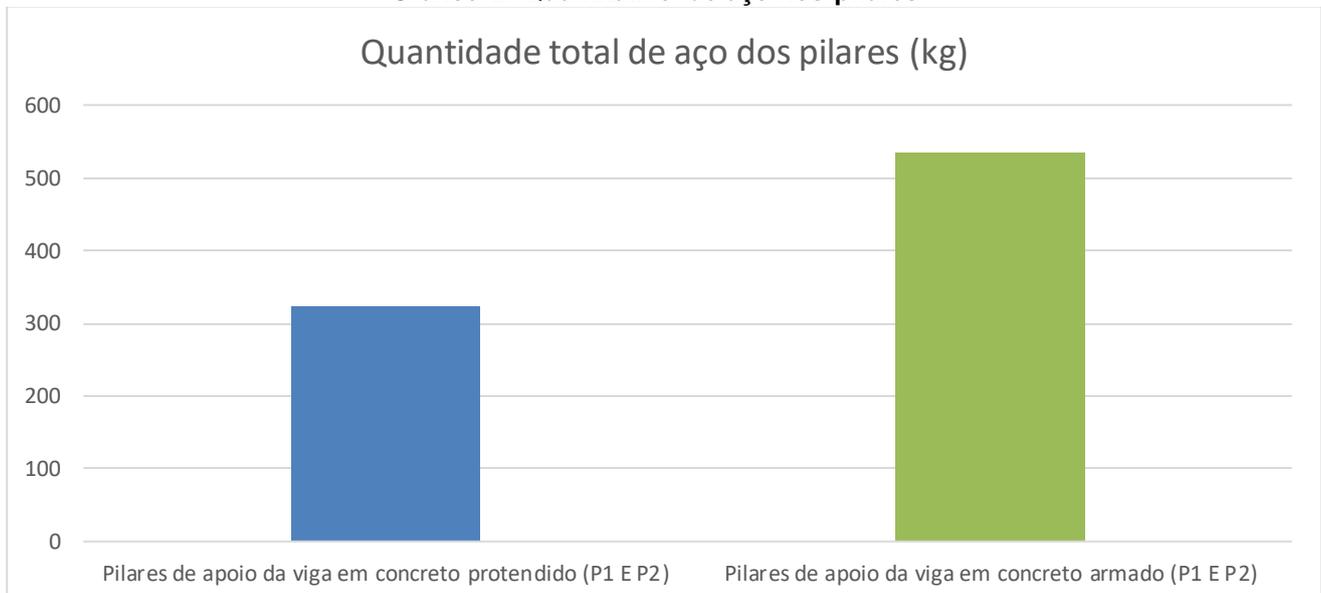
Fonte: (AUTORES, 2023)

Tabela 5: Resumo de materiais para os pilares em kg

Armadura	Pilares de apoio da viga em concreto protendido (P1 E P2)	Pilares de apoio da viga em concreto armado (P1 E P2)
Aço CA-50 armadura longitudinal (Kg)	299	499
Aço CA-60 armadura transversal (Kg)	24	35
Concreto C40 (m ³)	0,97	0,97

Fonte: (AUTORES, 2023)

Gráfico 2: Quantitativo de aço nos pilares



Fonte: (AUTORES, 2023)

A armadura longitudinal dos pilares foi significativamente influenciada pela protensão, os apoios da viga protendida apresentaram uma taxa de aço longitudinal menor, a diferença foi de 200 kg, cerca de 40 % a menos de consumo nos pilares que apoiam a

viga protendida. Esse efeito ocorre devido ao momento negativo menor gerado pela viga no pilar em relação a obra em concreto armado, outra consideração importante fica por conta da quantidade de estribos, que para os pilares da viga em concreto armado foi de 35 kg, cerca de 45% a mais que nos pilares da viga protendida. Tal resultado pode ser explicado pelo momento fletor ser maior nos pilares da viga em concreto armado convencional e a cortante está relacionada ao momento solicitante, podendo ser maior ou menor a depender do momento fletor.

Quando uma viga possui pouca rigidez e um alto momento solicitante parte desse esforço é transferido para os pilares, como a viga em concreto protendido possui rigidez a flexão superior que a viga em concreto armado ocorre uma diminuição no momento transmitido aos apoios, o que justifica a menor quantidade de aço presente neles.

As duas obras são iguais em questão de dimensões dos elementos, portanto o consumo de concreto foi basicamente o mesmo, no entanto, se for feita uma análise, pode-se chegar à conclusão de que a viga em concreto protendido poderia apresentar dimensões menores, pois existe uma grande margem para a flecha limite, cerca de 5,92 cm, e a rigidez dela é muito alta.

Para a estimativa de custos foi utilizado como referência a tabela SINAPI, disponibilizada pela CAIXA ECONOMICA FEDERAL referente ao estado de Goiás e para complementar foi empregada a tabela de preços da GOINFRA para alguns insumos que não existiam na tabela SINAPI.

Tabela 6: Valor dos materiais

Insumos referentes ao estudo de caso, referência SINAPI e GOINFRA outubro/2023				
Insumo	Codigo ref.	Unidade	Preço (R\$)	
CONCRETO USINADO BOMBEAVEL, CLASSE DE RESISTENCIA C40, COM BRITA 0 E 1, SLUMP =100 +/- 20 MM, EXCLUI SERVICO DE BOMBEAMENTO (NBR 8953)	SINAPI-00034496	m ³	629,24	
ACO CA-50, 6,3 MM, VERGALHAO	SINAPI-00000032	kg	8,38	
ACO CA-60, 4,2 MM, OU 5,0 MM, OU 6,0 MM, OU 7,0 MM, VERGALHAO	SINAPI-00043059	kg	7,51	
ACO CA-50, 8,0 MM, VERGALHAO	SINAPI-00000033	kg	8,43	
ACO CA-50, 10,0 MM, VERGALHAO	SINAPI-00000034	kg	7,94	
ACO CA-50, 12,5 MM OU 16,0 MM, VERGALHAO	SINAPI-00043055	kg	6,88	
ACO CA-50, 20,0 MM OU 25,0 MM, VERGALHAO	SINAPI-00043056	kg	7,93	
CORDOALHA CP-190 RB	GOINFRA-10102	kg	12,73	

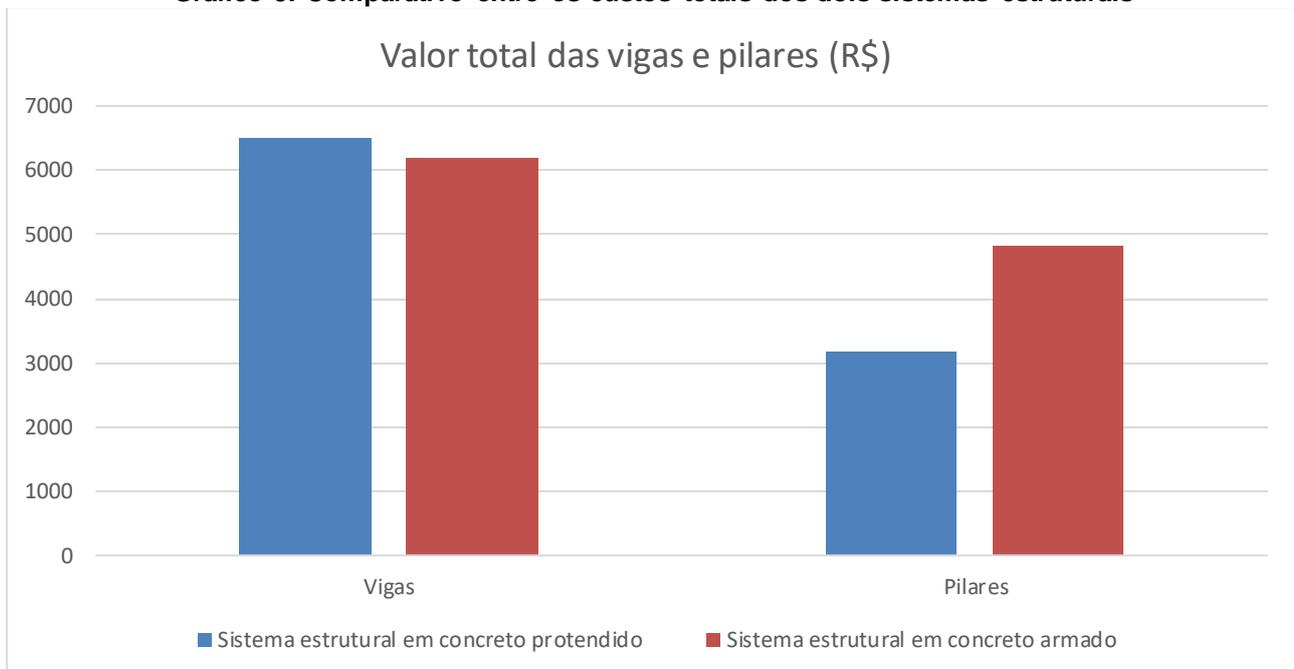
Fonte: (SINAPI, 2023)

Tabela 7: Quantitativo de aço

	Viga em concreto protendido (R\$)	Viga em concreto armado (R\$)	Pilares da viga protendida (R\$)	Pilares da viga em concreto armado (R\$)
Armadura longitudinal (R\$)	1197,76	3005,52	2371,07	3957,07
Armadura transversal (R\$)	628,50	620,12	180,24	262,85
Armadura ativa (R\$)	2024,07	NA	NA	NA
Armadura de fretagem (kg)	75,87	NA	NA	NA
Concreto (R\$)	2572,33	2572,33	614,13	614,13
Total	6498,53	6197,97	3165,44	4834,05

Fonte: (AUTORES, 2023)

Gráfico 3: Comparativo entre os custos totais dos dois sistemas estruturais



Fonte: (AUTORES, 2023)

Pode-se concluir, a partir desse comparativo presente na Tabela 7, que a viga em concreto armado é R\$ 300,56 mais econômica que a viga em concreto protendido no que diz respeito a insumos, no entanto os pilares de apoio da viga sem protensão são R\$ 1658,61 mais caros. Quando se compara o conjunto viga-pilar a estrutura em concreto protendido é mais eficiente e econômica, cerca de R\$ 1444,22 de diferença, devido a economia que se obteve nos pilares. No entanto esse levantamento não incluiu o valor de mão de obra que para a viga protendida é maior, porém como a necessidade de aço passiva

na viga em concreto armado é muito maior e considerando o diâmetro das armaduras esse valor pode ser compensado quando se observa as horas de trabalho do armador.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A viga protendida apresentou uma grande vantagem em relação a quantidade armadura passiva necessária em comparação com a viga em concreto armado, no entanto isso foi balanceado com a necessidade de armadura ativa na viga protendida. A diferença nos pilares foi gritante, os apoios da viga protendida foram muito aliviados em relação ao momento fletor, o que resultou em uma área de aço muito menor.

O sistema estrutural em concreto armado funciona melhor quando tem pilares de apoio rígidos para o controle de flechas, portanto permitindo vigas mais esbeltas para vãos de grandes dimensões, no entanto existem situações onde a arquitetura não permite tais pilares, devido a isso a viga precisa ter maior altura, o que pode prejudicar a estética, logo surge o concreto protendido como uma boa solução para vão consideráveis onde a arquitetura não permite que a viga seja muito alta nem pilares de grandes seções para servir como engaste para a viga em concreto armado.

A estrutura em concreto protendido, por apresentar flechas muito abaixo do máximo permitido por norma, poderia ter suas dimensões reduzidas, isso poderia ajudar a reduzir o peso próprio do concreto que é muito elevado e geralmente é um grande obstáculo quando se trata de estruturas de grandes vão, pois aumenta muito o peso da estrutura. A redução dos elementos estruturais também seria benéfica em relação as armaduras mínimas exigidas em norma, parâmetro que está diretamente relacionado com o tamanho dos elementos estruturais, portanto a área de aço da estrutura como um todo seria menor.

Este trabalho também demonstra a importância da utilização de softwares para a modelagem, pois o resultado apresentado tende a ser mais próximo da realidade devido ao cálculo integrado da estrutura, o que possibilita uma otimização superior quando comparado ao cálculo manual interferindo na quantidade de insumos necessários para execução da obra, que nesse caso tende a ser menor.

Tendo em vista as situações apresentadas cabe ao projetista e aos construtores a tarefa de decidir qual sistema será mais adequado para cada obra, no entanto para se tomar a melhor decisão é necessária uma análise criteriosa dos dois sistemas tendo acesso a dados como os apresentados nesse trabalho para que se tome a melhor decisão.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7483: **Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido - Especificação**. 4ª. Ed. Local de Publicação: Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. 3ª. Ed. Local de Publicação: Rio de Janeiro, 2014.

BASTOS, P.S. **Fundamentos do Concreto Protendido**. Agosto/ 2019. Bauru/ SP. Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <https://www.feb.unesp.br/pbastos/> (Paulo.ss.bastos@unesp.br).

CHOLFE, L., BONILHA, L. **Concreto Protendido: Teoria e Prática**, 1ª. ed. Editora Pini Ltda. São Paulo, 2013.

CHUST CARVALHO, R; RODRIGUES FIGUEIREDO FILHO, J. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 4ª. ed. São Carlos, 2014.

CHUST CARVALHO, R. **Estruturas em Concreto Protendido: Pré-Tração, Pós-tração, Cálculo e Detalhamento**. 1ª. Ed. Local de Publicação: Editora Pini Ltda, São Paulo, 2012.

SOUZA VERÍSSIMO, G; LENZ CÉZAR JR, K,M. **Concreto Protendido: Fundamentos Básicos**. 4ª. ed. Local de Publicação: Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

WAGNER; FOSTER; KILPATRICK; GRAVINA. **Prestressed Concrete**. 5ª. ed. Local de Publicação: www.pearson.com.au, editora: A Division of Pearson Australia Group Pty Ltd. Australia, 2022.

NAAMAN, Antoine. **Prestressed Concrete: Analysis and Design**. 2. ed. Michigan: Techno Press 3000, 2004. 1071 p. v. 1. ISBN 0-9674939-1-9.

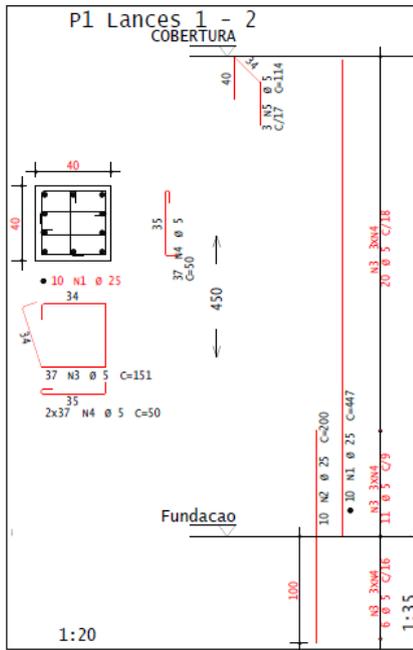
CAIXA. Relatório de insumos. [S. l.], 17 out. 2023. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_646. Acesso em: 27 out. 2023.

GOINFRA. TABELA DE TERRAPLENAGEM, PAVIMENTAÇÃO E OBRAS DE ARTE ESPECIAIS. [S. l.], 28 jun. 2023. Disponível em: https://www.goinfra.go.gov.br/arquivos/arquivos/Obras%20Rodoviaras/T208%20S/MATERIAL_T208.pdf. Acesso em: 27 out. 2023.

APENDICE B – Detalhamento dos pilares de apoio da viga em concreto armado

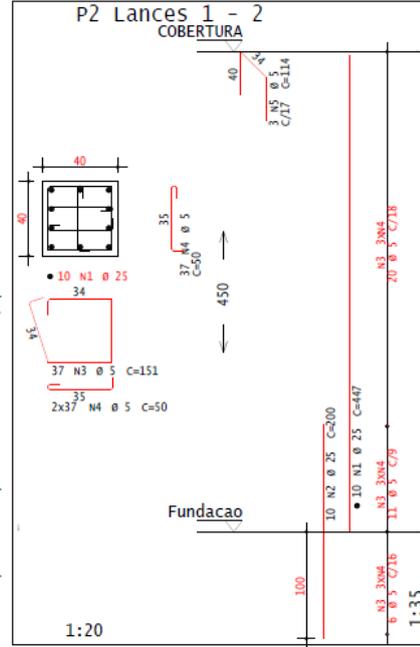
ESTUDO – NÃO EXECUTAR

desenho produzido por versão acadêmica, proibido uso comercial

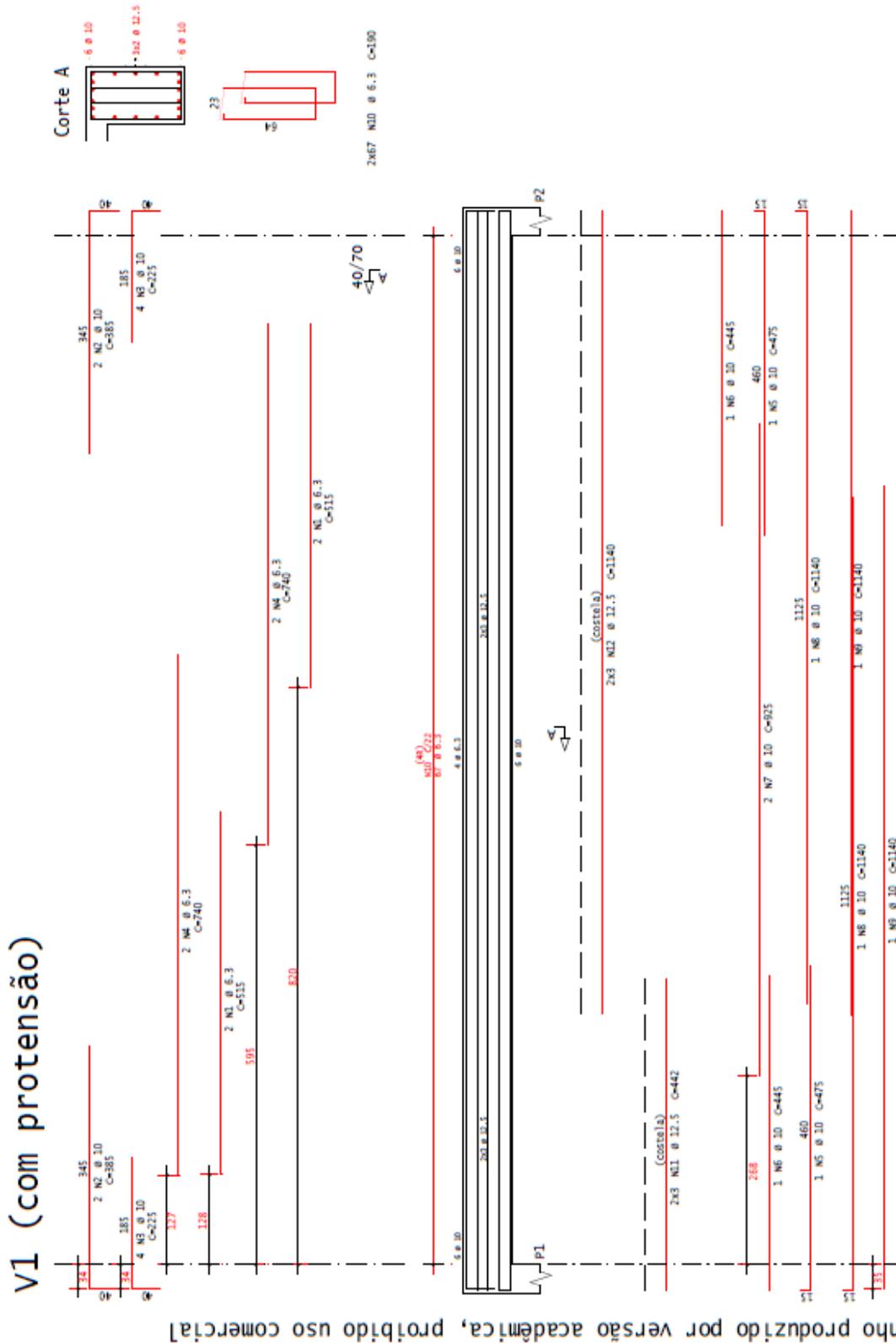


ESTUDO – NÃO EXECUTAR

desenho produzido por versão acadêmica, proibido uso comercial

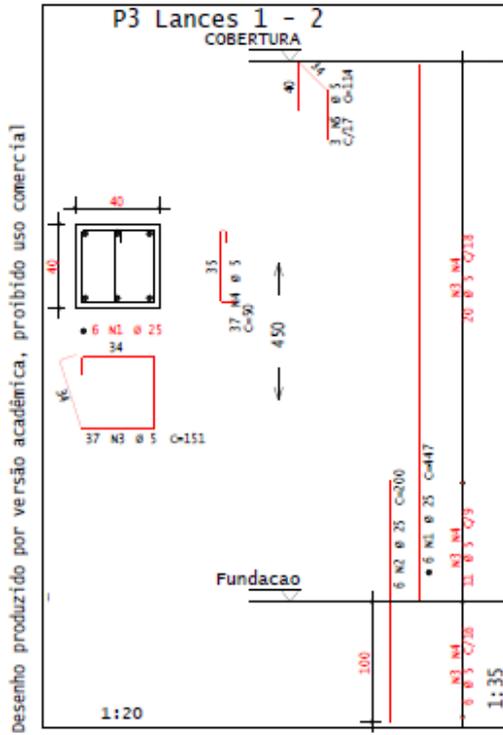


APENDICE C – Detalhamento da armadura passiva da viga protendida



OBS.: Olhar desenho de cabos protendidos.

APENDICE D – Detalhamento dos pilares da viga em concreto protendido



ESTUDO - NÃO EXECUTAR

