



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
MOBILIDADE**

**UTILIZAÇÃO DE VIGAS PROTENDIDAS COMO SOLUÇÃO PARA GRANDES
VÃOS – ESTUDO DE CASO EM RESIDÊNCIA DE ALTO PADRÃO**

PÂMELLA ALMEIDA SIQUEIRA

ORIENTADOR: Prof. Ms. Paulo Henrique Menezes Silva.

**PUBLICAÇÃO:
ANÁPOLIS
2022**

PÂMELLA ALMEIDA SIQUEIRA

**UTILIZAÇÃO DE VIGAS PROTENDIDAS COMO SOLUÇÃO PARA GRANDES
VÃOS – ESTUDO DE CASO EM RESIDÊNCIA DE ALTO PADRÃO**

Trabalho de Conclusão do Curso II de Engenharia Civil da
Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás – Campus Anápolis, como requisito
parcial para conclusão de curso.

Orientador: Prof. Ms. Paulo Henrique Menezes Silva.

ANÁPOLIS, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Siqueira, Pâmella Almeida

S618u Utilização de vigas protendidas como solução para grandes vãos: estudo de caso em residência de alto padrão. / Pâmella Almeida Siqueira. – Anápolis: IFG, 2022.
52 f. il. color.

Orientador: Prof. Me. Paulo Henrique Menezes Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás: Campus Anápolis – Bacharelado em Engenharia Civil da Mobilidade, 2022.

1. Concreto protendido. 2. vigas protendidas. 3. soluções arquitetônicas.

I. Silva, Paulo Henrique Menezes (orient.).

II. Título.

CDD 624.1834



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Pâmella Almeida Siqueira

Matrícula: 20181060130158

Título do Trabalho: UTILIZAÇÃO DE VIGAS PROTENDIDAS COMO SOLUÇÃO PARA GRANDES VÃOS – ESTUDO DE CASO EM RESIDÊNCIA DE ALTO PADRÃO.

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Documento assinado digitalmente
PAMELLA ALMEIDA SIQUEIRA
Data: 18/01/2023 09:04:00-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Local

Anápolis, 18/01/2023.
Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS

ATA Nº 09/2022

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No 6º dia do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e dois, às 14:00 horas, por meio de defesa presencial, foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso do Graduando Pamela Almeida Siqueira (matrícula 20181060130158) do curso de Engenharia Civil da Mobilidade. A banca foi composta pelos seguintes membros: Paulo Henrique Menezes Silva, Natalia Gonçalves Torres e Mohamad Yahya Mohamad Omar, sob a presidência do primeiro. O trabalho de conclusão de curso tem como título "UTILIZAÇÃO DE VIGA PROTENDIDA COMO SOLUÇÃO PARA GRANDES VÃOS - ESTUDO DE CASO EM RESIDÊNCIA DE ALTO PADRÃO", da área de Estruturas de Concreto, sob orientação do Prof. Paulo Henrique Menezes Silva. Após a apresentação, tendo sido o autor arguido pela Banca Examinadora, a nota obtida foi 82,75 (Oitenta e dois pontos, e setenta e cinco décimos) e o Trabalho de Conclusão de Curso foi considerado (X) aprovado () aprovado com correções () reprovado pela banca examinadora.

Encerra-se a presente sessão às 14 horas e 40 minutos. Eu, Prof. Paulo Henrique Menezes Silva, dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da Banca e pelo graduando.

Prof. Paulo Henrique Menezes Silva

(Assinado eletronicamente)

Prof. Natalia Gonçalves Torres

(Assinado eletronicamente)

MOHAMAD YAHYA MOHAMAD
OMAR:70355991187
Assinado de forma digital por MOHAMAD
YAHYA MOHAMAD OMAR:70355991187
Dados: 2022.12.19 07:55:53 -03'00'
Prof. Mohamad Yahya Mohamad Omar

(Assinado eletronicamente)

Documento assinado digitalmente



PAMELLA ALMEIDA SIQUEIRA
Data: 19/12/2022 08:56:05-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Pamela Almeida Siqueira
(Graduando)

Documento assinado eletronicamente por:

- Natalia Gonçalves Torres, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO, em 16/12/2022 17:10:21.
- Paulo Henrique Menezes Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/12/2022 21:13:14.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 15/12/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 357689
Código de Autenticação: 94322e614c



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Pedro Ludovico, s/ nº, Reny Cury, ANÁPOLIS / GO, CEP 75131-457
(62) 3703-3373 (ramal: 3373)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado capacidade para realizar mais um de meus sonhos e por se fazer presente em tudo na minha vida. Agradeço à Nossa Senhora por estar sempre me protegendo e guiando o meu caminho. Agradeço aos meus amados pais por confiarem no meu futuro e se dedicarem tanto para minha formação profissional e pessoal. Agradeço ao meu namorado por sempre me dar forças e ser meu maior motivador. Por fim, agradeço meus irmãos e a toda a minha família pelo apoio e carinho.

Dedico a Deus que me permitiu vivenciar um dos meus maiores sonhos e em especial à minha família que se fez muito presente.

“Talvez se possa pensar que, porque somos engenheiros, a beleza não nos preocupa ou não tentamos construir estruturas, ao mesmo tempo que elas são sólidas e duradouras, lindas? As funções da força não são sempre as condições de harmonia não escrita?”

Gustave Eiffel

RESUMO

O presente trabalho abordará assuntos correlatos às estruturas de concreto protendido, em especial aos elementos denominados vigas. Tomou-se como objeto de estudo a execução de duas vigas de concreto protendido, a fim de representar a elaboração de tais elementos. Apresenta-se o processo construtivo como fonte de solução para questões arquitetônicas (grandes vãos livres e maior integração dos ambientes) e estruturais (possibilitando que haja peças com maior resistência aos esforços solicitantes), suas vantagens e desvantagens, o modo de execução e fatores de projeto que levaram a elaboração do modelo seguido. Através de uma análise de projeto resultou-se na comparação do sistema de concreto protendido com o concreto armado e, com isso, a relação de custo entre os dois métodos.

Palavras-chave: Concreto protendido, Vigas protendidas, Soluções arquitetônicas.

ABSTRACT

The present work will address issues related to prestressed concrete structures, especially to elements called beams. The object of study was the execution of two beams of prestressed concrete, in order to represent the elaboration of such elements. The construction process is presented as a source of solution for architectural issues (large free spans and greater integration of environments) and structural (allowing there to be parts with greater resistance to the requesting efforts), their advantages and disadvantages, the mode of execution and design factors that led to the elaboration of the model followed. Through a project analysis, it resulted in the comparison of the prestressed concrete system with reinforced concrete and, therefore, the cost relationship between the two methods.

Keywords: Prestressed concrete, Prestressed beams, Architectural solutions.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora.

SELAP: Seminário Latino-Americano de Protensão.

MPa: Mega Pascal.

f_{ct} = Força de resistência à tração direta (MPa).

f_c = Força de resistência à compressão (MPa).

F = Carga de ruptura (N).

d = Diâmetro do corpo de prova (mm).

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Diagrama de tensão-deformação simplificado de acordo com NBR 6118.	21
Figura 02: Ilustração do esquema de fabricação de peças de protensão pré-tracionadas.	24
Figura 03: Ilustração do esquema de fabricação de peças de protensão pós-tracionadas com aderência posterior.	25
Figura 04: Cordoalha de sete fios engraxada segundo BASTOS, 2018.	26
Figura 05: Ancoragem com cunhas segundo BASTOS, 2018.	28
Figura 06: Diagrama de protensão x tempo para peças pré-tracionadas, segundo BASTOS, 2018.	29
Figura 07: Diagrama de protensão x tempo para peças pós-tracionadas, segundo BASTOS, 2018.	29
Figura 08: Planta de locação das vigas.	31
Figura 09: Detalhamento da viga V202.	33
Figura 10: Cabos de protensão da viga V202.	33
Figura 11: Detalhamento da viga V203.	34
Figura 12: Cabos de protensão da viga V203.	35
Figura 13: Detalhamento das ancoragens.	36
Figura 14: Detalhamento da viga V202 apenas em concreto armado.	37
Figura 15: Detalhamento da viga V203 apenas em concreto armado.	37
Figura 16: Armadura da viga.	40
Figura 17: Estribos da viga.	40
Figura 18: Viga com os cabos de protensão.	41
Figura 19: Concretagem da viga V203.	42
Figura 20: Protensão da viga V203.	43

Figura 21: Protensão da viga V202.	43
Figura 22: Cunhas dos cabos de protensão.	44
Figura 23: Viga V203.	45
Figura 24: Viga V202.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Classes de resistência de concretos estruturais, de acordo com NBR 6118.	17
Tabela 02: Especificação dos fios de aço para concreto protendido, segundo o catálogo de 2021 da ArcelorMittal.	20
Tabela 03: Classe de agressividade do concreto.	21
Tabela 04: Relação entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.	21
Tabela 05: Relação de grau de protensão.	26
Tabela 06: Relação de protensão da viga V202.	31
Tabela 07: Resumo de protensão da viga V203.	33
Tabela 08: Resumo de aço da viga V202 sem protensão.	36
Tabela 09: Resumo de aço da viga V202 sem protensão.	37
Tabela 10: Resumo comparativo de aço.	44
Tabela 11: Comparativo de volume de concreto.	45
Tabela 12: Comparativo da área de forma.	45
Tabela 13: Resumo comparativo das seções.	46
Tabela 14: Preço do aço das vigas protendidas.	47
Tabela 15: Preço do aço das vigas protendidas.	47
Tabela 16: Comparativo de preço.	47

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01: Cálculo de resistência à compressão segundo NBR 5739.	17
Equação 02: Cálculo de resistência média à tração direta segundo NBR 6118, para f_{ck} até 50MPa.	18
Equação 03: Cálculo de resistência média à tração direta segundo NBR 6118, para f_{ck} de 55 a 90MPa.	18
Equação 04: Cálculo do módulo de elasticidade segundo NBR 6118, para f_{ck} de 20 a 50MPa.....	19
Equação 05: Cálculo do módulo de elasticidade segundo NBR 6118, para f_{ck} de 55 a 90MPa.....	19

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos.....	16
1.1.1. Objetivo geral	16
1.1.2. Objetivos específicos.....	17
1.2. Justificativa	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. O concreto e sua resistência a compressão	18
2.2. O concreto e sua resistência à tração	19
2.3. Coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade.....	19
2.4. Diagrama de tensão-deformação do aço.....	20
2.5. Classe de agressividade ambiental	22
2.6 Concreto protendido	23
2.6.1. Vantagens e desvantagens.	23
2.6.2. Concreto protendido pré-tracionado: aderência inicial.	24
2.6.3. Concreto protendido pós-tracionado com aderência posterior	25
2.6.4. Concreto protendido pós-tracionado sem aderência.....	26
2.7. Níveis de protensão	26
2.8. Ancoragem	28
2.9. Força de protensão.....	28
2.10. Perdas de protensão	30
2.10.1. Escorregamento dos fios na ancoragem.	30
2.10.2. Relaxação da armadura.....	30
2.10.3. Retração inicial do concreto.	30
2.10.4. Variação da força de protensão.	30
3. METODOLOGIA	31

3.1. Objeto de estudo	31
3.2. Execução.....	32
3.3. Dados dos elementos de estudo	32
3.4. Análise de projeto.....	33
3.4.1. Dados do TQS	33
3.5. Protensão das vigas.....	33
3.5.1. Viga V202 com protensão	33
3.5.2. Viga V203 com protensão	35
3.5.3. Detalhamento das ancoragens	37
3.6. Vigas sem protensão.....	38
3.6.1. Viga V202 somente em concreto armado	38
3.6.2. Viga V203 somente em concreto armado	39
3.7. Execução.....	40
3.7.1. Montagens das armações	40
3.7.2. Nível do fundo de viga	42
3.7.3. Montagem dos cabos de protensão	42
3.7.4. Concreto	43
3.7.5. Cura do concreto.....	43
3.7.6. Protensão	44
3.7.7 Ancoragem com cunhas.....	45
3.7.8. Dados por elemento	45
3.7.9. As vigas pós protensão	46
4. RESULTADOS.....	47
4.1. Comparativo da quantidade de aço.....	47
4.2. Comparativo do volume de concreto.....	48
4.3. Comparativo área de tábuas para forma	48
4.4. Comparativo das seções.....	48

4.5. Desafio em relação à arquitetura	49
4.6. Comparativo de custo	49
5. CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é baseada em padrões de execução que comumente são empregados, e no que se refere a execução de vigas este modelo é o concreto armado. O concreto estrutural é o que comporta tais formas de construção, ele possui prerrogativas estabelecidas na NBR 6118 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2014). Entretanto, a construção civil juntamente com a tecnologia das construções tem tomado um crescimento elevado e, com isso, metodologias que auxiliam na agilidade e atendimento das exigências arquitetônicas destacam-se neste âmbito.

A NBR 6118 define três tipos de elementos de concreto: elementos de concreto simples, elementos de concreto armado e elementos de concreto protendido. Segundo PATRICIO (2019), no Brasil o mais disseminado é o concreto armado, sistema em que a armadura não sofre tensionamento, diferentemente do concreto protendido. O sistema de concreto protendido permite que o projetista estrutural ao projetar vigas que possuem menos seção transversal e resistem a maiores esforços. As vigas que, por sua vez, eram elementos que ficavam expostos agora podem ser elementos que passam despercebidos dentro da própria arquitetura da edificação (MELO, 2021).

Instaurou-se, em 2012, o evento Seminário Latino-Americano de Protensão, com o objetivo de disseminar este sistema e apresentar estudos baseados nele. Segundo a SELAP, ainda em 1948 foi realizada a primeira obra com concreto protendido no Brasil, e desde então esta metodologia é aplicada para reduzir ou até mesmo anular a ação das tensões de tração em que as peças em questão são submetidas, como as vigas.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo geral apresentar uma análise crítica sobre o método construtivo de vigas protendidas, com o intuito de apresentar sua relevância no que se refere as soluções para a arquiteturas de longos vãos e grandes esforços solicitantes, a fim de

proporcionar mais resistência sem prejudicar a esbeltez da peça. Para isso, realizou-se a adoção de duas vigas como objeto de estudo.

1.1.2. Objetivos específicos

A fim de obter o objetivo geral proposto no presente trabalho são apresentados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o estudo de caso escolhido para melhor entendimento prático.
- Promover conhecimento sobre vigas de concreto protendido e estimular interesse o uso de vigas protendidas.
- Apresentar a solução de vigas protendidas para atendimentos a grandes vãos e atendimento a arquiteturas arrojadas.

1.2. Justificativa

O concreto, segundo José Dafico Alves (2002), é um material que possui características como trabalhabilidade e consistência. Entretanto, quando se refere a resistência mecânica ele tem, por proeminência, destaque no esforço de compressão, não sendo tão eficaz quando se trata de tração. Por esta razão aplica-se juntamente com o concreto o material denominado aço, a fim de complementar esta falha em relação às solicitações que as peças comumente estão expostas. Com o intuito de aumentar cada vez mais esse poder de resistência à tração é que se aplica a protensão nas cordoalhas de aço.

Nestas condições maximiza-se o poder de resistência das peças e, consequentemente, contribui para a implementação de maiores vãos que por elas podem ser vencidos. É neste contexto que o presente trabalho tomou este método de construção como cerne de discussão e objeto de avaliação acadêmica, tomando as vigas de concreto protendido como solução para tais problemáticas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O concreto e sua resistência a compressão

O concreto é classificado, segundo a NBR 6118 (ABNT,2014), em classes de resistência e seus módulos, para fins estruturais. Esta classificação tem como base a resistência característica à compressão, estabelecida pelo ensaio de corpo de prova regido pela forma de moldagem da NBR 5738 (ABNT, 2003) e forma de rompimento da ABNT NBR 5739 (ABNT, 1994). Esta classificação segue a seguinte Tabela 1 abaixo:

TABELA 1 - Classes de resistência de concretos estruturais, de acordo com NBR 6118.

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E _{ci} (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E _{cs} (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
α_i	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,0	1,0

TABELA 1. Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Para essas determinações é utilizada a unidade de medida MPa – Mega Pascal, que é a pressão base de 1 kN distribuída uniformemente sobre uma superfície de 1 m² de área. Esta pressão é considerada perpendicular a força aplicada. O concreto a ser aplicado no objeto de estudo será de 30 MPa. Esse cálculo da resistência a compressão obtido pelo corpo de prova é regido, segundo na NBR 5739 (ABNT, 1994), pela divisão da carga de ruptura pela área da seção transversal, como a seguinte equação:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \cdot d^2} \quad (1)$$

Sendo:

f_{ct} = Força de resistência à tração direta (MPa).

f_c = Força de resistência à compressão (MPa).

F = Carga de ruptura (N).

d = Diâmetro do corpo de prova (mm).

2.2. O concreto e sua resistência à tração

Segundo PATRICIO (2019), a resistência do concreto no que se refere à tração é na ordem de 10% em relação a sua resistência à compressão. A NBR 6118 (ABNT,2014) apresenta que, em relação ao cálculo de resistência a tração direta deve-se seguir as prerrogativas da NBR 7222 (ABNT,1994), entretanto, caso não haja a obtenção do ensaio em questão deve-se considerar as seguintes equações para um valor médio de f_{ct} :

$$f_{ct} = 0,3.f_{ck}^{2/3} \quad (2)$$

Para concretos com f_{ck} de até 50 MPa.

$$f_{ct} = 2,12.\ln(1+0,11.f_{ck}) \quad (3)$$

Para concretos com f_{ck} de 55 a 90 MPa.

2.3. Coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade.

Na NBR 6118 (ABNT,2014) apresenta-se, em sua generalidade, uma determinação para o coeficiente de Poisson (ν) de 0,2 para tensões de compressão menores que $0,5.f_c$ e tensões de tração menores que f_{ct} . Este coeficiente relaciona as tensões deformação do concreto. Sendo, f_c = Força de resistência à compressão (MPa) e f_{ct} = Força de resistência à tração direta (MPa).

Para o módulo de elasticidade, por sua vez, pode ser obtido por ensaio regido pela NBR 8522 (ABNT, 2017) ou usando as seguintes equações para o cálculo do módulo de elasticidade inicial, segundo NBR 6118 (ABNT, 2014). Este módulo mostra a tensão necessária para chegar ao estado de deformação do concreto, ou seja, mostra a sua rigidez. O módulo de elasticidade pode assumir infinitos valores (PATRICIO, 2019), obtido pelo diagrama tensão-deformação.

$$E_{ci} = \alpha \cdot E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

Para concretos com f_{ck} de 20 a 50 MPa.

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha \cdot E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3} \quad (5)$$

Para concretos com f_{ck} de 55 a 90 MPa.

2.4. Diagrama de tensão-deformação do aço

O aço utilizado para realizar protensão de vigas é o aço CP 190 RB. Os fios de aço possuem as seguintes características segundo o catálogo de 2021 da ArcelorMittal:

- Perda máxima por relaxamento de 3%.
- Valor médio do módulo de elasticidade de 205 kN/mm².
- Correspondência de 9,81 MPa.

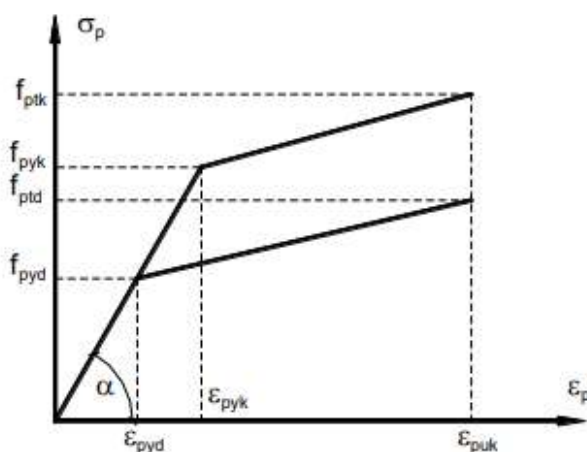
TABELA 2 - Especificação dos fios de aço para concreto protendido.

Especificações dos produtos - fios para protensão						
Produto	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Massa(kg/1000m)	Carga de ruptura (kN)	Carga a 1%	Alongamento (%)
CP 145 RB	9,0	63,6	499,0	89,5	80,5	3,0
CP 150 RB	8,0	50,3	395,0	73,0	65,7	3,0
CP 170 RB	7,0	38,5	302,0	63,3	56,9	3,0
CP 175 RB	4,0	12,6	98,0	21,0	18,9	3,0
	5,0	19,6	154,0	33,0	29,7	3,0
	6,0	28,3	222,0	47,7	43,0	3,0
CP 190 RB	4,0	12,6	98,0	22,8	20,5	3,0
	5,0	19,6	154,0	35,9	32,3	3,0
	6,0	28,3	222,0	51,8	46,6	3,0

Fonte: CATÁLOGO FIOS E CORDOALHAS PARA CONCRETO PROTENDIDO (2021).

A NBR 6118 (ABNT,2014) relata que se deve seguir o diagrama de tensão-deformação fornecido pelo fabricante, na sua ausência pode-se considerar o diagrama simplificado, como segue a figura. Sendo considerada uma temperatura entre -20 e 150 graus.

FIGURA 1 – Diagrama tensão-deformação do aço.



Fonte: BASTOS (2018).

2.5. Classe de agressividade ambiental

Segundo a NBR 6118 (ABNT,2014), a classe de agressividade está vinculada em ações físicas e químicas que atuam na estrutura, fora as mecânicas que comumente já são calculadas nas estruturas. A classe de agressividade deve-se obedecer através da tabela 3 a seguir.

TABELA 3 - Classes de agressividade do concreto.

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

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Com esta classificação é que se encontra a relação água/cimento em massa e a classe de concreto de forma simplificada como o informado na tabela 4.

TABELA 4 - Relação entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

2.6 Concreto protendido

O concreto protendido teve sua primeira aplicação em 1866, nos Estados Unidos (BASTOS, 2018). O revolucionário método inovou e influenciou drasticamente a construção civil, possibilitando obras mais ousadas e que poderiam vencer grandes vãos. O cerne da protensão consiste na inserção de tensões aplicadas, portanto, o concreto protendido surge com a função de aprimorar a atuação do concreto armado (PATRICIO, 2019). O intuito da protensão é, basicamente, que esses esforços aplicados nas cordoalhas de aço façam com que, posteriormente, a estrutura retorne a sua dimensão inicial e, com isso, haja uma força de compressão da peça.

Bastos (2018) divide estas tensões em duas vertentes, o pré-tração e pós-tração. Com tais aplicações as armaduras de aço passam a ser consideradas como armaduras ativas. Estas são, ainda, subdivididas por sua aderência:

- Concreto protendido pré-tracionado: aderência inicial.
- Concreto protendido pós-tracionado: aderência posterior ou sem aderência.

2.6.1. Vantagens e desvantagens.

Segundo (CASTRO, 2011) este sistema construtivo possui vantagens e desvantagens, dentre elas podemos citar:

Vantagens:

- Reduz os esforços de flexão, devido a força de tração que tende a “levantar” a viga em seus pontos de maior incidência deste esforço.
- Considerável redução de material utilizado, concreto e aço, em relação ao concreto armado, por formar elementos mais esbeltos.
- Reduz a peso próprio da estrutura, pelo motivo acima citado, levando menos cargas à fundação da edificação.
- Vence maiores vãos.

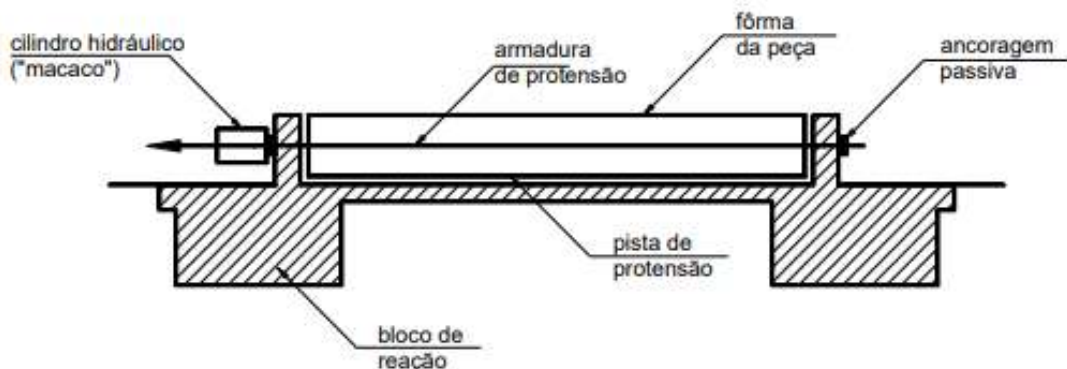
Desvantagens:

- Requer mão de obra especializada.
- Depende de uma análise da viabilidade técnica e econômica.
- Exige a realização de projeto estrutural mais elaborado e não convencional ao nível do concreto armado.

2.6.2. Concreto protendido pré-tracionado: aderência inicial.

Neste método, o aço é fixado em uma extremidade da peça por meio de um ancoramento (ancoragem passiva), e o outro lado será aplicada a força de um macaco-hidráulico que irá tracionar as cordoalhas de aço (ancoragem ativa). É aplicada uma tração um pouco menor que a tensão do limite elástico nestes cabos de aço para que ele tenha a tendência de voltar ao estado inicial sem sofrer deformação, ou seja, a força aplicada não pode atingir a zona plástica do material. Então o concreto é colocado na forma da peça de forma que ele preenche e se adere na armadura pré-tracionada. Depois de certo tempo em que o concreto já conseguiu atingir sua resistência é retirada a tensão previamente aplicada, fazendo com que gere uma compressão na seção transversal da peça (BASTOS,2018).

FIGURA 2 - Ilustração do esquema de fabricação de peças de protensão pré-tracionadas.



Fonte: BASTOS (2018).

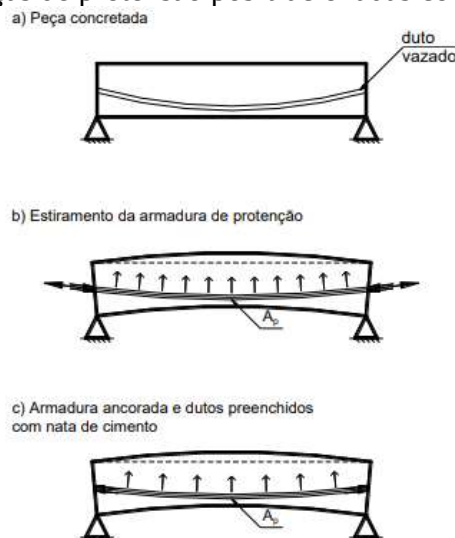
Este processo é considerado com aderência inicial pois há uma transmissão desta tensão de protensão para o concreto que esta aderente à armadura. Tal método tende a possuir uma baixa perda de tensão, o que auxilia na eficiência e na lenta deformação da peça (BASTOS, 2018).

2.6.3. Concreto protendido pós-tracionado com aderência posterior

No concreto pós-tracionado há a inserção de “conduites” que, posteriormente irão envolver os cabos de aço. Estes dutos são colocados sem os cabos e segue-se a concretagem normalmente, deixando um vazio para passagem dos cabos. Quando o concreto atinge o tempo adequado, como na pré-tensão, passa-se as cordoalhas de aço dentro dos dutos e aplica-se a tração por macaco-hidráulico fazendo a ancoragem ativa, enquanto a outra extremidade é a ancoragem passiva. Após a aplicação da tensão o aço tende a voltar para seu estado inicial, por estar na zona elástica, gerando uma tensão de tração na seção transversal da peça e é feita a ancoragem.

O concreto protendido pós-tracionado com aderência posterior, é quando após esse processo é lançada uma nata de cimento dentro deste conduíte a fim de gerar esta aderência interna. A figura a seguir mostra tal processo ilustrativamente (BASTOS, 2018).

FIGURA 03 - Fabricação de peças de protensão pós-tracionadas com aderência posterior.



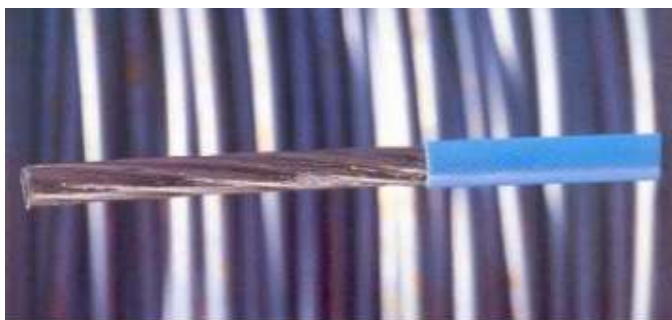
Fonte: BASTOS (2018).

Esta nata de cimento é composta pela proporção de a cada 36 a 40 kg de água utiliza-se 100 kg de cimento. Ela deve ser elaborada de acordo com as normativas da NBR 7681 que a nomeia como “calda de cimento para injeção”.

2.6.4. Concreto protendido pós-tracionado sem aderência

A forma de execução do concreto protendido pós-tracionado sem aderência e, basicamente, a mesma do concreto protendido pós-tracionado com aderência posterior, entretanto, nela não há a aplicação da nata de concreto ao final do processo. Esta é a primordial diferença entre elas. Nela geralmente utiliza-se a cordoalha de aço engraxada como mostra a figura a seguir (BASTOS,2018).

FIGURA 04 - Cordoalha de sete fios engraxada.



Fonte: BASTOS (2018).

2.7. Níveis de protensão

Os níveis de protensão, segundo a NBR 6118 (ABNT,2014), são advindos da intensidade de tensão de protensão em função proporção da armadura ativa em relação a passiva.

Protensão completa: esta confere a peça um melhor comportamento, gera tração nula no concreto quando submetido a este tipo de protensão (PATRICIO, 2019).

Protensão limitada: são de menos intensidade que a protensão total, o concreto é submetido a pequenas tensões de tração de forma que não apresente fissuras (PATRICIO, 2019).

Protensão parcial: neste caso o concreto é submetido a grandes tensões de tração e verifica-se o limite para abertura de fissuras (PATRICIO, 2019).

Tabela 05: Relação de grau de protensão.

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinações de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4\text{mm}$	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3\text{mm}$	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2\text{mm}$	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	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	Combinação frequente

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

2.8. Ancoragem

O método mais simples de ancoragem é composto por cunhas e porta-cunhas que fazem a fixação das cordoalhas de aço. As cunhas podem ser bipartidas ou tripartidas. Como exemplifica a figura 05.

FIGURA 05 - Ancoragem com cunhas.

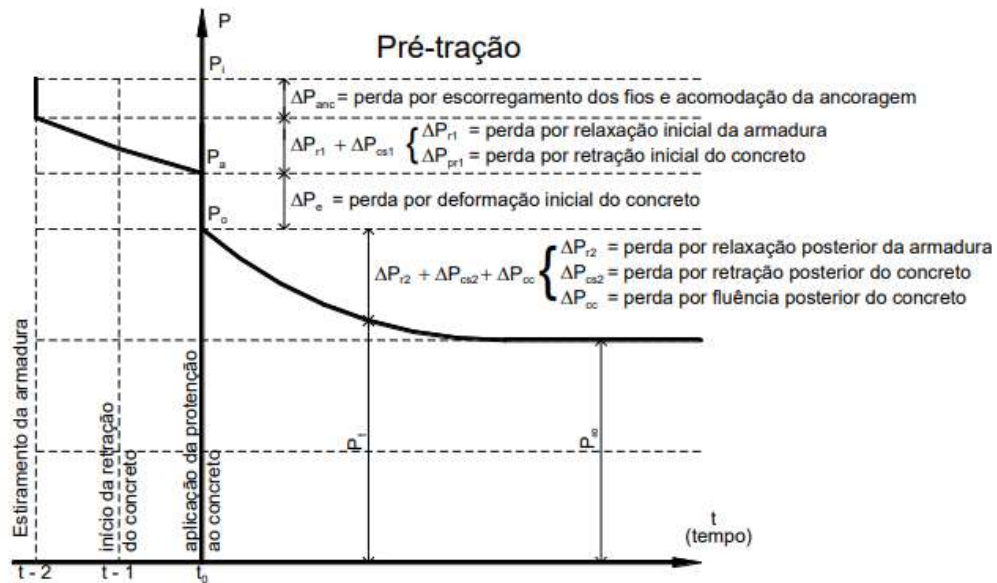


Fonte: BASTOS (2018).

2.9. Força de protensão

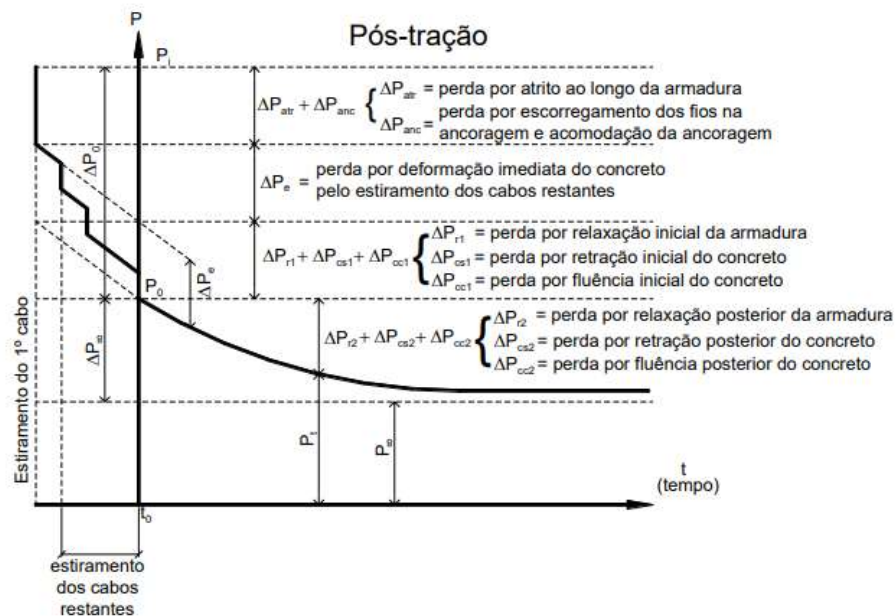
Os valores representativos da força de protensão são as bases para orientar-se quanto a verificação dos esforços solicitantes. A figura a seguir mostra tais valores em função do tempo para os casos de peças pré-tracionadas ou pós-tracionadas. Caso os cabos, em casos de pré-tensão, não estejam totalmente esticados e retos, deve-se levar em consideração a perda gerada pelo atrito nas curvas, considerada uma perda de protensão na ancoragem (BASTOS,2018).

FIGURA 06 - Diagrama de protensão x tempo para peças pré-tracionadas.



Fonte: BASTOS (2018).

FIGURA 07 - Diagrama de protensão x tempo para peças pós-tracionadas.



Fonte: BASTOS (2018).

2.10. Perdas de protensão

Há diversos fatores que podem gerar perda da força de protensão, são eles a listagem a seguir (BASTOS,2018):

2.10.1. Escorregamento dos fios na ancoragem.

Este tipo de perda é considerado na ancoragem ativa e se torna proporcional ao comprimento da pista de protensão.

2.10.2. Relaxação da armadura.

A relaxação ocorre a partir do momento em que a tensão provocada pelo macaco-hidráulico é removida do aço estirado.

2.10.3. Retração inicial do concreto.

Este fator, por sua vez, causa uma perda de tensão de protensão na armadura.

2.10.4. Variação da força de protensão.

Ocorre quando não há a aplicação linearmente adequada da força de protensão desde a protensão inicial quando os cabos são estirados até a força quando há a ancoragem.

3. METODOLOGIA

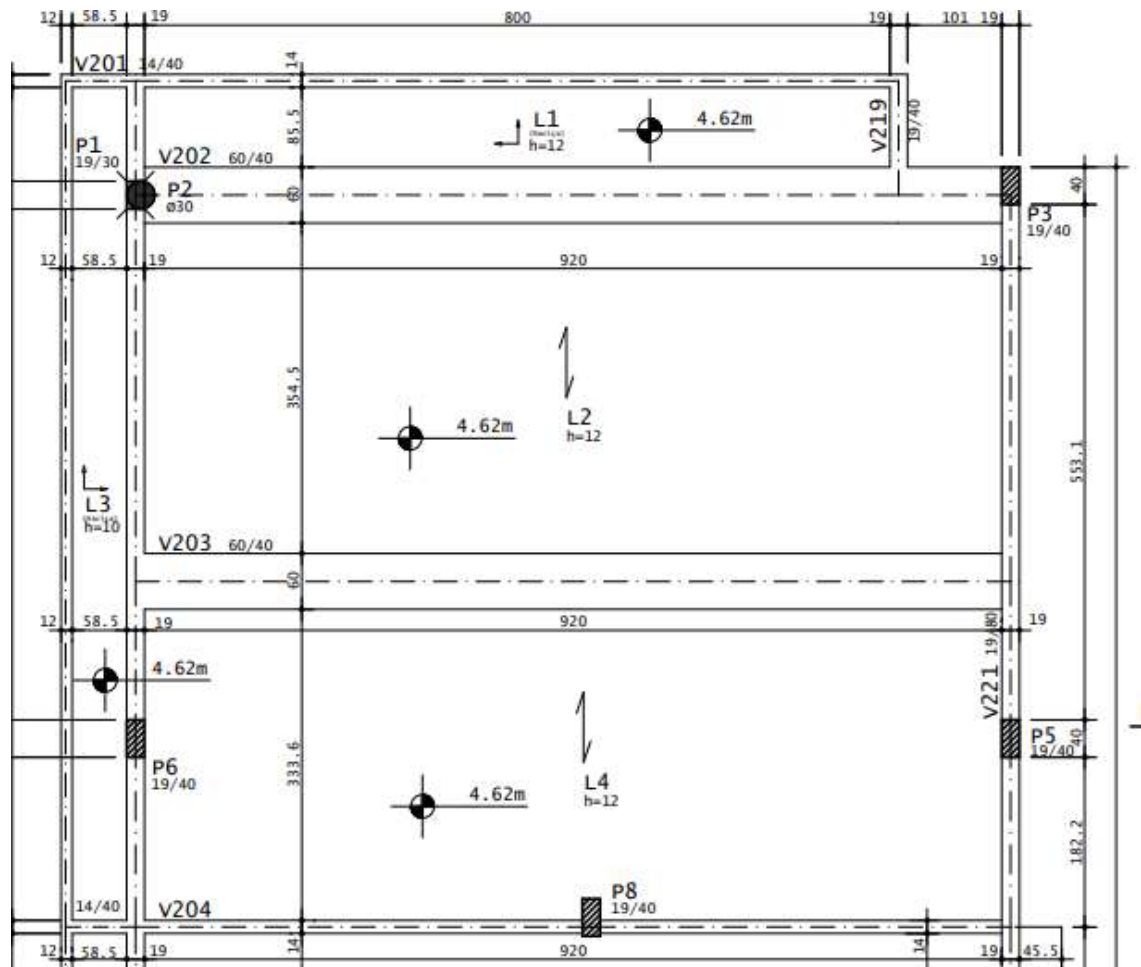
Neste trabalho foi determinado um objeto de avaliação a fim de estabelecer um estudo do comportamento de vigas protendidas em uma residência de alto padrão. Considera-se também uma pesquisa bibliográfica visto que, a fundamentação teórica é de suma importância para o entendimento prático, levando em consideração os autores por esse trabalho citados. Os procedimentos aplicados às vigas a serem estudadas serão definidos, por sua vez, pela norma 6118 (ABNT,2014), a qual baseasse na categorização exposta na NBR 8953 (ABNT, 2015).

3.1. Objeto de estudo

Tipologia: Residência de alto padrão. Área construída: 353,64 m²

Primeiramente, definiu-se o elemento estrutural de pesquisa que no caso se trata de vigas. Na análise realizada será considerado vigas biapoiadas de concreto protendido, nomeadas como V202 e V203. Foram considerados os carregamentos permanentes e variáveis para as solicitações que elas devem atender. Serão apresentadas as cargas de projeto as quais elas devem suportar e os vãos que elas devem vencer. O estudo é voltado à duas das vigas do sistema estrutural da edificação que foram realizadas pelo método de concreto pós-tracionado sem aderência inial, visto que não foram todas as vigas da residência que foram construídas por esta forma de execução.

FIGURA 08: Planta de locação das vigas.



Fonte: De autoria própria (2022).

3.2. Execução

Através do acompanhamento da execução destes dois elementos estruturais, é apresentado os registros fotográfico e breve discussão revelando a metodologia de fabricação do concreto protendido em vigas.

3.3. Dados dos elementos de estudo

Foram consideradas duas vigas como exemplo, localizadas na obra de estudo. A primeira delas denominada viga V202 com 9,50 m de vão livre e a segunda denominada viga

V203 com o mesmo comprimento de vão livre. A metodologia aplicada deste processo de execução foi o Concreto protendido pós-tracionado sem aderência.

3.4. Análise de projeto

Através do Software TQS realizou-se uma versão simplificada para as vigas de estudo levando em consideração caso elas fossem executadas apenas por concreto armado, realizando assim, uma análise comparativa desta viabilidade. Por meio deste, segue a apresentação do projeto estrutural dos dois elementos a fim de ilustrar e realçar o entendimento da parte de projeto.

3.4.1. Dados do TQS

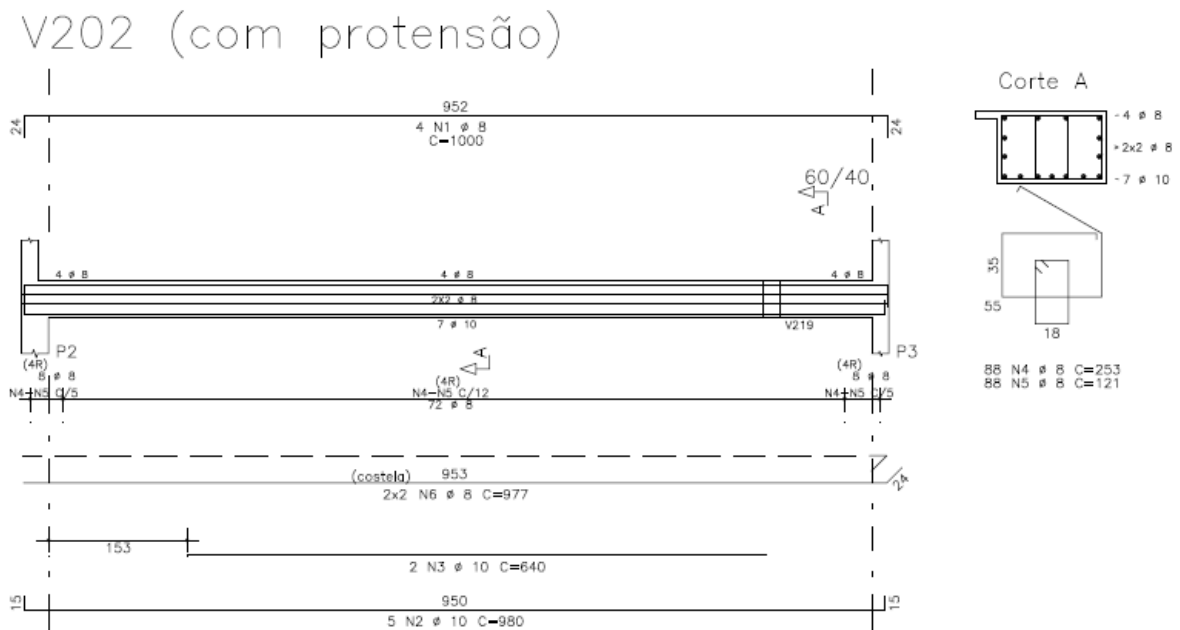
Para configuração do projeto utilizou-se o peso permanente de 1 kN/m^2 , o peso acidental de $1,5 \text{ Kn/m}^2$. O peso da alvenaria, por sua vez, foi calculado de acordo com a altura das paredes, levando em consideração o peso específico de 18 kN/m^3 . Já o peso próprio dos elementos é calculado de forma automática pelo TQS.

3.5. Protensão das vigas

3.5.1. Viga V202 com protensão

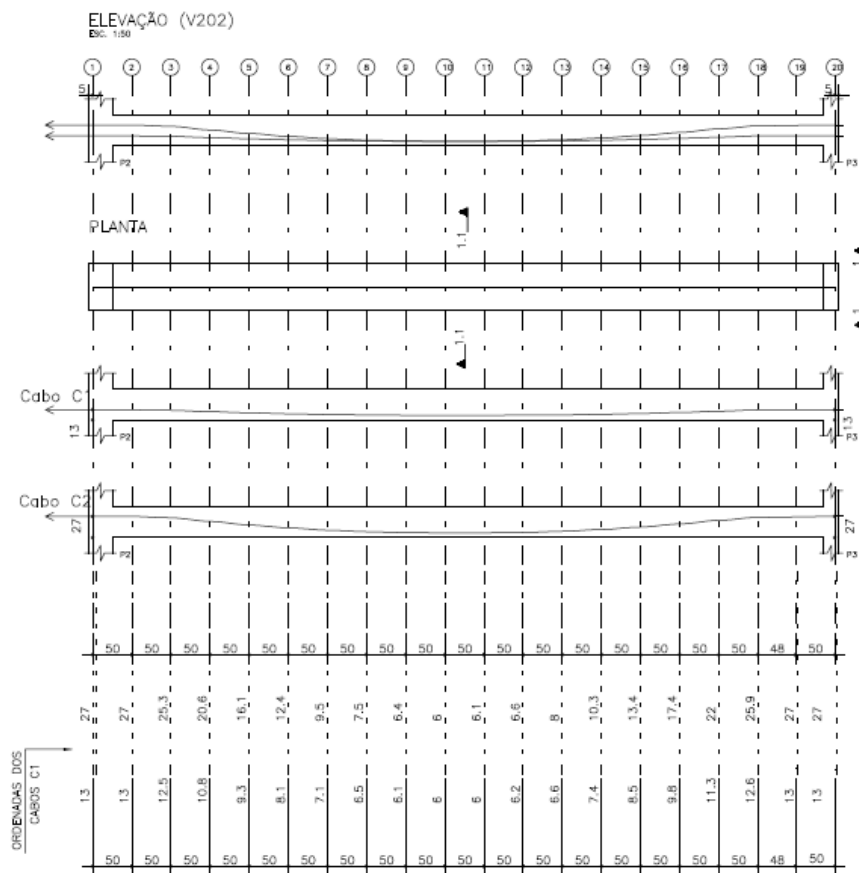
A Viga V202 seguiu o detalhamento ilustrado na figura 09, de acordo com o projeto estrutural elaborado para a edificação de estudo. Os cabos a ela inseridos seguiram a configuração definida na figura 10.

FIGURA 09 – Detalhamento da viga V202.



Fonte: De autoria própria (2022).

FIGURA 10 – Cabos da viga V202.



Fonte: De autoria própria (2022).

Este elemento seguiu, de acordo com o projeto de protensão, a seguinte configuração. Nesta utilizou-se armadura composta por barras de ferro com 8 e 10 milímetros como apresenta o projeto de detalhamento.

Resumo da protensão:

TABELA 06: Resumo de protensão da viga V202.

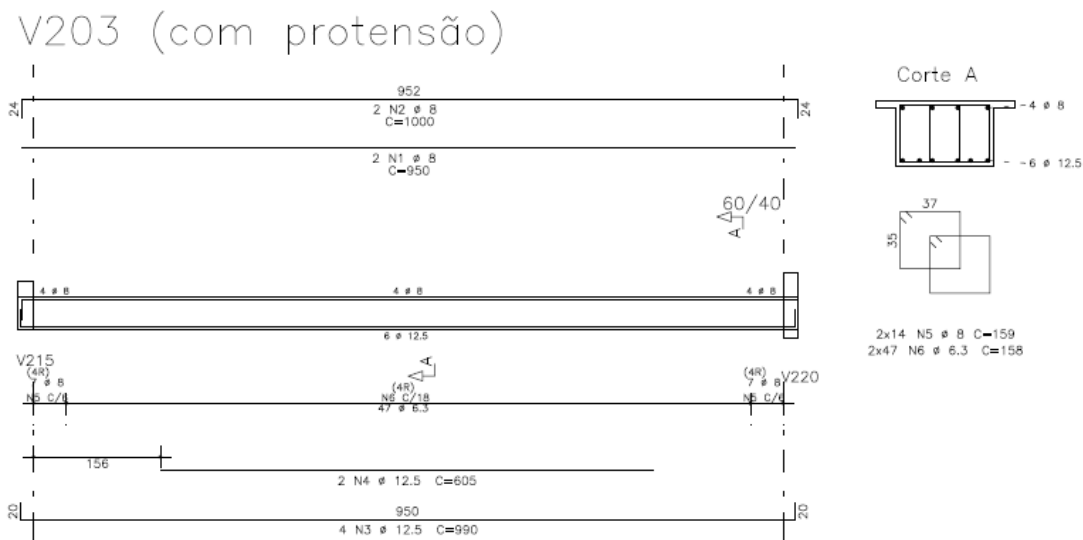
Cabo	Quantidade por viga	Cordoalhas	Comprimento (m)	Força de protensão (tf)	Alongamento de projeto (mm)	Peso (kg)
C1	1	8 de 12,7 (CP190 RB)	10,21	119,2	66	72,7
C2	1	8 de 12,7 (CP190 RB)	10,18	119,2	65	72,5

Fonte: De autoria própria (2022).

3.5.2. Viga V203 com protensão

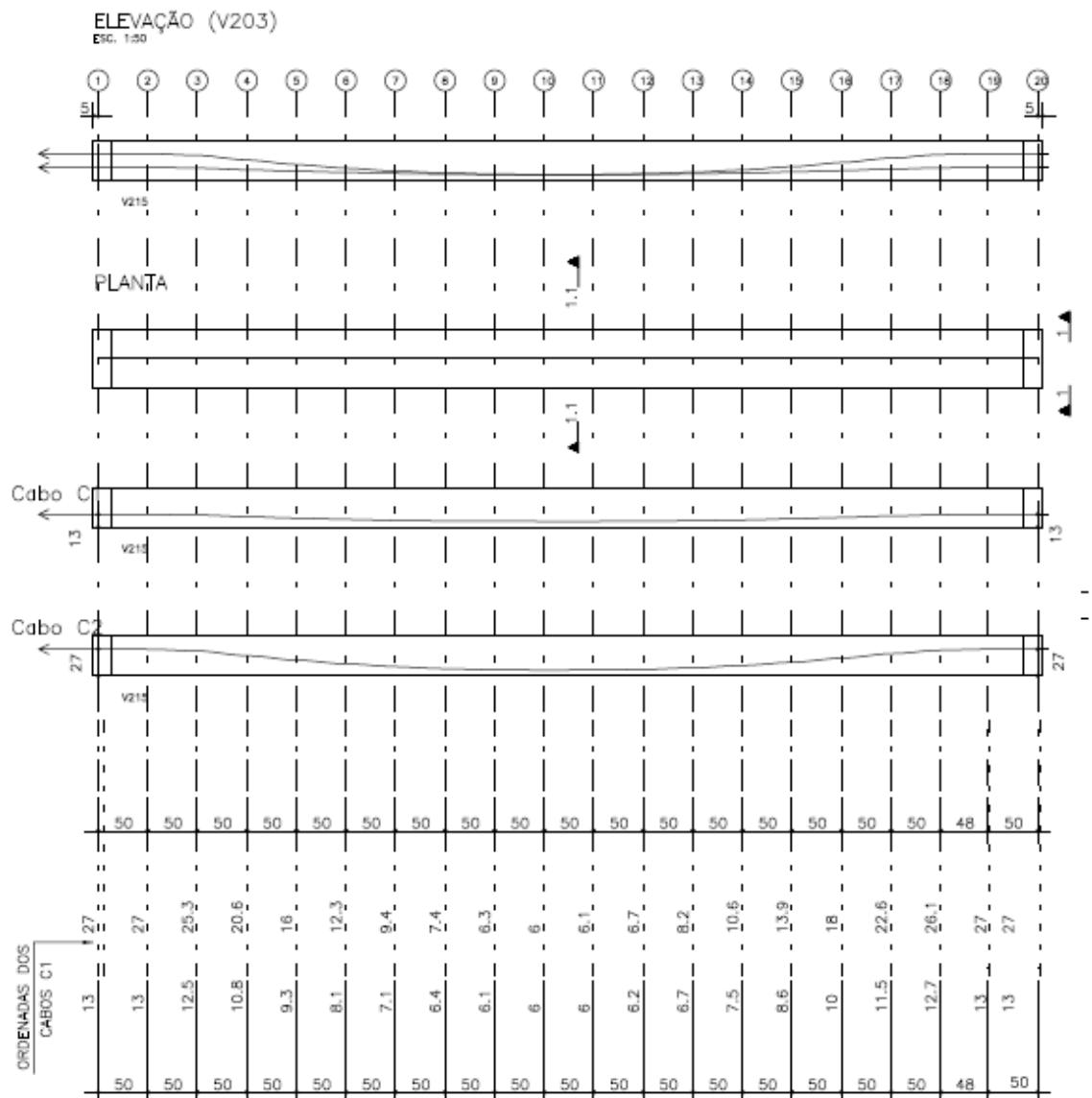
A Viga V203 seguiu o detalhamento ilustrado na figura 11, de acordo com o projeto estrutural elaborado para a edificação de estudo. Os cabos a ela inseridos seguiram a configuração definida na figura 12.

FIGURA 11 – Detalhamento da viga V203.



Fonte: De autoria própria (2022).

FIGURA 12 – Cabos da viga V203.



Fonte: De autoria própria (2022).

Este elemento seguiu, de acordo com o projeto de protensão, a seguinte configuração. Nesta utilizou-se armadura composta por barras de ferro com 6.3, 10 e 12.5 milímetros como apresenta o projeto de detalhamento.

Resumo da protensão:

TABELA 07: Resumo de aço da viga V203.

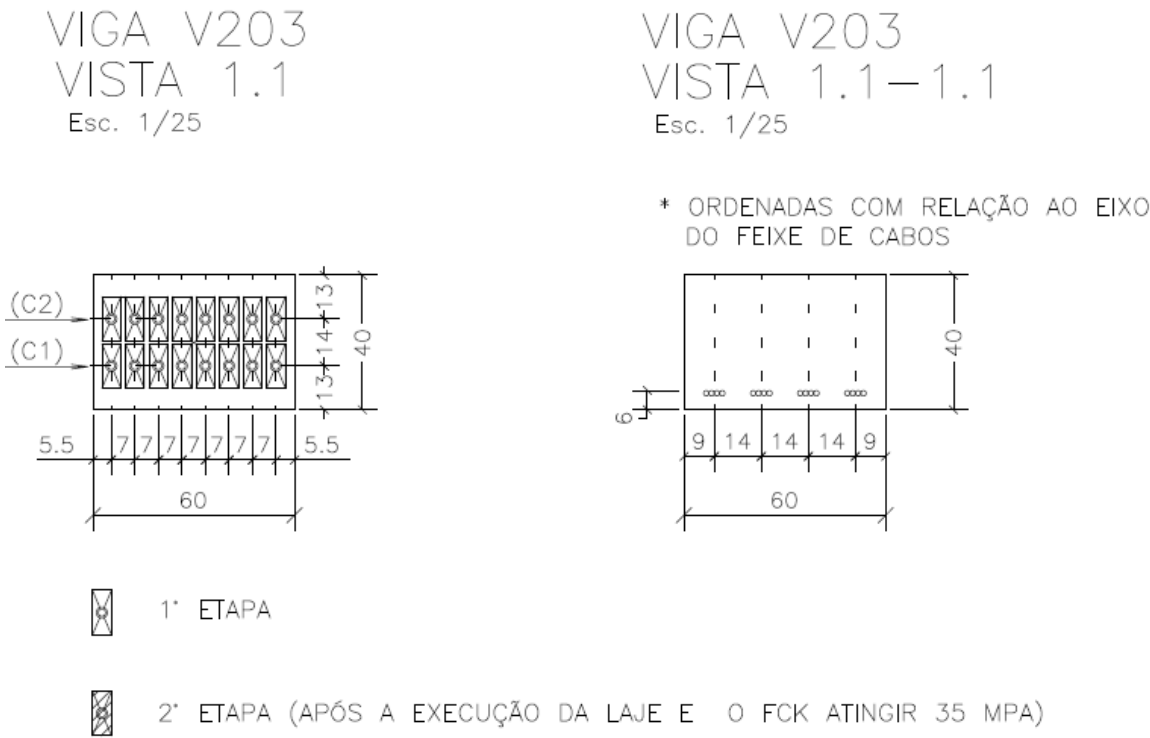
Cabo	Quantidade por viga	Cordoalhas	Comprimento (m)	Força de protensão (tf)	Alongamento de projeto (mm)	Peso (kg)
C1	1	8 de 12,7 (CP190 RB)	10,21	119,2	66	72,7
C2	1	8 de 12,7 (CP190 RB)	10,18	119,2	65	72,5

Fonte: De autoria própria (2022).

3.5.3. Detalhamento das ancoragens

As vigas protendidas V202 e V203, seguiram o detalhamento de ancoragem como representado na figura 13.

FIGURA 13 – Detalhamento das ancoragens.



Fonte: De autoria própria (2022).

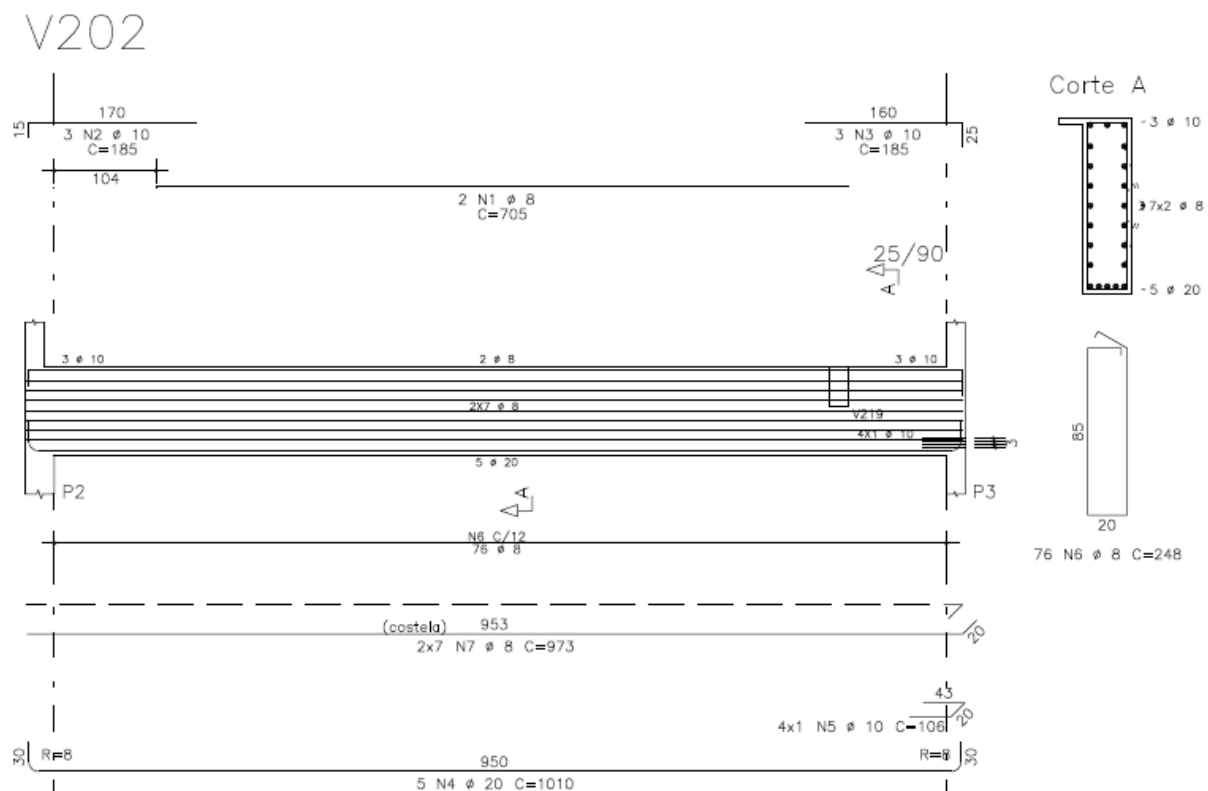
3.6. Vigas sem protensão

Utilizando o mesmo software, o TQS, realizou-se a remoção da protensão no projeto já existente e ao executar foi gerado uma nova seção para os mesmos vãos a serem vencidos e mantendo as deformações, ou seja, as flexas, na mesma ordem de grandeza.

3.6.1. Viga V202 somente em concreto armado

Através da elaboração de um novo projeto estrutural obteve-se a configuração apresentada na figura 14, considerando a viga V202 apenas em concreto armado.

FIGURA 14 – Detalhamento da viga V202 em concreto armado.



Fonte: De autoria própria (2022).

Este elemento seguiu a seguinte configuração para sua execução somente em concreto armado. Nesta utilizou-se armadura composta por barras de ferro com 8, 10 e 20 milímetros como apresenta a tabela resumo de aço, resultando no resumo de aço informado na tabela 08.

TABELA 08: Resumo de aço da viga 202 somente em concreto armado

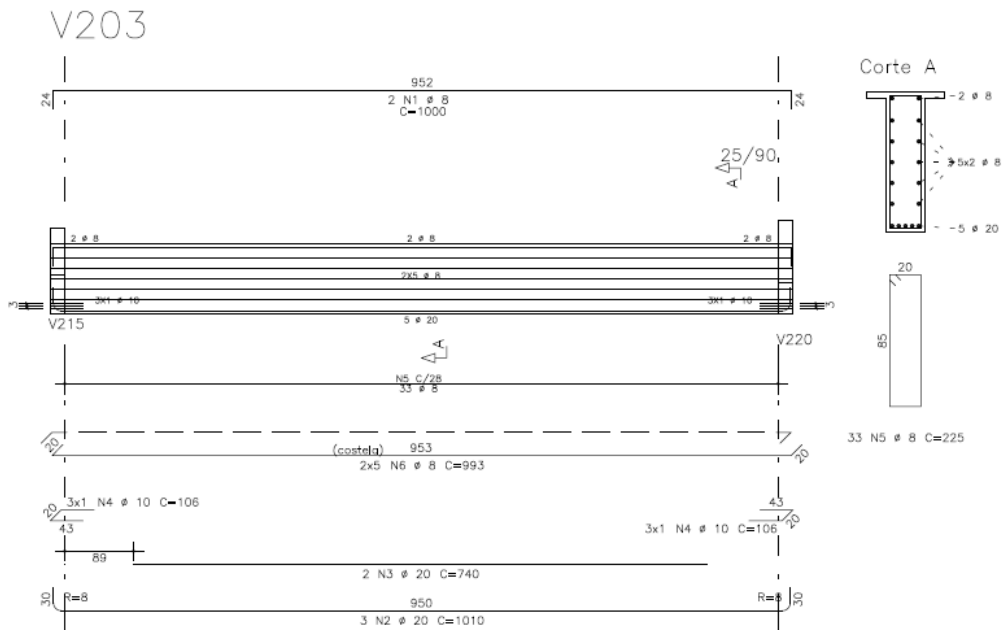
Bitola (mm)	Comprimento total (m)
202	
8	338,8
10	15,34
20	50,5

Fonte: De autoria própria (2022).

3.6.2. Viga V203 somente em concreto armado

Através da elaboração de um novo projeto estrutural obteve-se a configuração apresentada na figura 15, considerando a viga V203 apenas em concreto armado.

FIGURA 15 – Detalhamento da viga V203 em concreto armado.



Fonte: De autoria própria (2022).

Este elemento seguiu a seguinte configuração para sua execução somente em concreto armado. Nesta utilizou-se armadura composta por barras de ferro com 8, 10 e 20 milímetros como apresenta a tabela resumo de aço, resultando no resumo de aço apresentado na tabela 09.

TABELA 09: Resumo de aço da viga V203 somente em concreto armado.

Bitola (mm)	Comprimento total (m)
203	
8	193,55
10	6,36
20	45,1

Fonte: De autoria própria (2022).

3.7. Execução

Para melhor entendimento do objeto de estudo optou-se pelo acompanhamento de todo o processo de montagem e execução das vigas a serem verificadas.

3.7.1. Montagens das armações

Foi realizada toda a montagem da armação das vigas V202 e V203 respeitando todas as medidas constantes em projeto. A armadura passiva foi confeccionada *in loco* por armadores sendo que a armadura ativa de protensão foi feita por empresa especializada. A figura 16 apresenta a armadura passiva da viga protendida já executada, e a figura 17 a confecção dos estribos utilizados.

FIGURA 16 – Armadura da viga.



Fonte: De autoria própria (2022).

FIGURA 17 – Estribos da viga.



Fonte: De autoria própria (2022).

3.7.2. Nível do fundo de viga

Posteriormente, houve a localização dos níveis do fundo das vigas para montagem das formas de vigas. As formas utilizadas foram de madeira e um lado do painel manteve-se aberto para passagem das cordoalhas de aço, e só então se realizou o fechamento total da forma.

3.7.3. Montagem dos cabos de protensão

A empresa especializada em protensão realizou a montagem dos cabos, seguindo o seguinte sistema: montagem das placas de ancoragem passiva, passagem dos cabos por toda a extensão da viga, ancoragem passiva e marcação de 50 cm em 50 cm para regulagem de altura e consequentemente formação das curvas de projeto. Houve a verificação de todas essas alturas para certificar a correta execução de acordo com o projeto, resultando na disposição que mostra a figura 18.

FIGURA 18 – Viga com os cabos de protensão.



Fonte: De autoria própria (2022).

3.7.4. Concreto

O projeto estrutural contemplava a utilização de concreto com resistência de 30 MPa, entretanto, por opção do engenheiro responsável foi utilizado o concreto com fck de 40 MPa na concretagem ilustrada na figura 19. O objetivo era proporcionar a obtenção de maior resistência do concreto nas pequenas idades, buscando o atendimento do concreto necessária para a realização da protensão e consequentemente liberação de parte do escoramento da obra. Sendo assim, foi realizado o controle tecnológico do concreto por meio de moldagem de corpos de prova e posterior rompimento para a verificação da resistência do concreto nas seguintes idades: 7 dias, 14 dias e 28 dias de concretagem.

FIGURA 19 – Concretagem da viga.



Fonte: De autoria própria (2022).

3.7.5. Cura do concreto

É de extrema importância que realize a cura adequada do concreto, neste caso houve a umidificação todos os dias após a concretagem.

3.7.6. Protensão

Com 15 dias após a concretagem da peça estrutural, realizou-se o estiramento dos cabos de aço, como na figura 20 e 21. Com o macaco hidráulico instalado, há o tracionamento das cordoalhas, por tensão controlada, e posterior inserção das cunhas na ancoragem ativa. A força de tração aplicada foi de 15 tf e foi verificada através do controle do alongamento dos cabos de protensão.

FIGURA 20 – Protensão da viga 203.



Fonte: De autoria própria (2022).

FIGURA 21 – Protensão da viga 202.



Fonte: De autoria própria (2022).

3.7.7 Ancoragem com cunhas

A ancoragem é um elemento que garante que as forças que os cabos são submetidos seja integralmente transmitida ao concreto como informado na NBR 6118 (ABNT,2014). A ancoragem é utilizada para evitar o retorno do cabo de protensão sob tensão conforme previsto em projeto e foram finalizadas como a figura 22.

FIGURA 22 – Cunhas dos cabos de protensão.



Fonte: De autoria própria (2022).

3.7.8. Dados por elemento

Viga V202

Ancoragem passiva: 16 unidades.

Ancoragem ativa: 16 unidades.

Viga V203

Ancoragem passiva: 16 unidades.

Ancoragem ativa: 16 unidades.

3.7.9. As vigas pós protensão

Foi perceptível a tendência de elevação e rigidez dos elementos em que ocorreram a aplicação da protensão. Estas permanecem estáticas e sem nenhum deslocamento atípico, fazendo com que sua função seja tomada de forma adequada. As figuras 23 e 24 demonstram os elementos já finalizados.

FIGURA 23 – Viga V203.



Fonte: De autoria própria (2022).

FIGURA 24 – Viga V202.



Fonte: De autoria própria (2022).

4. RESULTADOS

Com a análise deste trabalho, chegou-se à veracidade de validar o método de fabricação de vigas em concreto protendido como uma excelente opção para solução para vencer de grandes vãos. Através disto, os estudos apresentados revelam os seguintes resultados em comparação com o sistema de concreto armado simples.

4.1. Comparativo da quantidade de aço

De acordo com a tabela a seguir esta foi a relação comparativa da quantidade de aço e quantidade de concreto utilizada nos dois processos construtivos.

TABELA 10: Resumo comparativo de aço

Com protensão			Sem protensão		
Bitola (mm)	Comprimento total (m)	Peso (kg)	Bitola (mm)	Comprimento total (m)	Peso (kg)
V202			V202		
8	408,2	161,239	8	338,8	133,826
10	61,8	38,1306	10	15,34	9,46478
			20	50,5	124,533
V203			V203		
6,3	148,52	36,3874	8	193,55	76,45225
8	83,52	32,9904	10	6,36	3,92412
12,5	51,7	49,7871	20	45,1	111,2166
Total (Kg) =		318,5345	Total (Kg) =		459,41675
Percentual (%) =					69,33

Fonte: De autoria própria (2022).

Com isso, nota-se que a viga V202 houve certa economia nos aços de 8 e 10 mm, entretanto fez-se necessário a inserção do aço de 20 mm que é mais robusto e com menor trabalhabilidade e maior valor. Já a viga V203 houve significativo aumento do aço de 8 mm e acréscimo do aço de 20 mm.

4.2. Comparativo do volume de concreto

Em relação ao volume de concreto segue a tabela como comparativo, trazendo, em metros cúbicos, os valores que foram admitidos na própria execução da obra.

Tabela 11 – Comparativo de volume de concreto.

Volume de concreto					
	Viga V202	Viga V203	Volume total	Custo unitário	Custo total (R\$)
Com protensão	2,28	2,28	4,56	R\$ 620,00	R\$ 2.827,20
Sem protensão	2,14	2,14	4,28	R\$ 620,00	R\$ 2.653,60

Fonte: De autoria própria (2022).

4.3. Comparativo área de tábuas para forma

Em relação à área de tábua segue a tabela como comparativo, trazendo valores em metros quadrados.

Tabela 12 – Comparativo da área de forma.

Formas					
	Área V202 (m ²)	Área V203 (m ²)	Área total (m ²)	Custo unitário (R\$)	Preço (R\$)
Com protensão	13,3	13,3	26,6	R\$ 16,50	R\$ 438,90
Sem protensão	19,48	19,48	38,96	R\$ 16,50	R\$ 642,84

Fonte: De autoria própria (2022).

4.4. Comparativo das seções

Com a retirada da protensão, conseqüentemente ocorreu o aumento da seção e então obteve-se configuração apresentada na tabela 13.

TABELA 13: Resumo comparativo das seções.

	Flexa máxima - Diferida	
	Sem protensão	Com protensão
Descrição	(25x90)	(60x40)
V202	1,23 cm	1,49 cm
V203	1,40 cm	1,29 cm

Fonte: De autoria própria (2022).

4.5. Desafio em relação à arquitetura

Os elementos estruturais estudados estão diante de um desafio arquitetônico que delimita sua altura, por questões locação. Por isso, optou-se pelo método construtivo de concreto protendido, a fim de reduzir suas seções, principalmente em relação à altura. Os dois objetos de estudo estão implantados em uma configuração composta por 9,5 m de vão livre e são eles que atendem as solicitações deste sistema.

4.6. Comparativo de custo

Como análise final foi elaborado um comparativo de custo entre os dois métodos construtivos, concreto armado e concreto protendido, para os objetos de estudos. Esta análise levou em consideração o volume de concreto, a área de tábua para forma e o peso do aço já apresentados. Com isso, obteve-se os seguintes resultados.

TABELA 14: Vigas protendidas.

COM PROTENSÃO				
Descrição	Comprimento total (m)	Peso (kg)	Custo médio unitário	Preço (R\$)
6,3 mm	148,52	36,39	R\$ 7,97	R\$ 290,01
8 mm	491,72	194,23	R\$ 7,97	R\$ 1.548,01
10 mm	61,80	38,13	R\$ 7,97	R\$ 303,90
12,5 mm	51,70	49,79	R\$ 7,97	R\$ 396,80
Cabos CP190	163,18	145,20	R\$ 30,00	R\$ 4.356,00
TOTAL (R\$)=				R\$ 6.894,72

Fonte: De autoria própria (2022).

TABELA 15: Vigas concreto armado.

SEM PROTENSÃO				
Bitola (mm)	Comprimento total (m)	Peso (kg)	Custo unitário (R\$)	Preço (R\$)
8,00	532,35	210,28	R\$ 7,97	R\$ 1.675,92
10,00	21,70	13,39	R\$ 7,97	R\$ 106,71
20,00	95,60	235,75	R\$ 7,97	R\$ 1.878,92
TOTAL (R\$)=				R\$ 3661,55

Fonte: De autoria própria (2022).

Tomando como base os dados apresentados o resultado segue a configuração da tabela de custos 16.

TABELA 16: Comparativo de preço.

	Forma	Concreto	Aço	Total (R\$)
Com protensão	R\$ 438,90	R\$ 2.827,20	R\$ 6.894,72	R\$ 10.160,82
Sem protensão	R\$ 642,84	R\$ 2.653,60	R\$ 3.661,55	R\$ 6.957,99
PERCENTUAL (%) =				146,03%

Fonte: De autoria própria (2022).

5. CONCLUSÃO

Por meio dos dados apresentados é possível verificar a redução da altura das vias, principalmente em relação à altura da peça, com a aplicação da protensão no elemento. Com isso, a execução se tornou facilitada, havendo assim, a obtenção de excelentes resultados que cumprem o solicitado, em questões estruturais e arquitetônicas. O sistema construtivo de concreto protendido foi satisfatório ao considerar a problemática exposta no objeto de estudo em questão e ao solucionar as restrições em que estão inseridas. Nota-se que é um sistema que possui desvantagens, como as citadas, que geram um custo oneroso de cerca de 46,03% a mais que o método de concreto armado. Entretanto, suas vantagens se sobressaem e revela um sistema em grande potencial podendo auxiliar em diversos critérios no âmbito da construção civil.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. D. **MANUAL DE TECNOLOGIA DO CONCRETO**. Editora da PUC Goiás, Goiânia-GO, 2002.
- ARCELORMITTAL. **Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido**. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- BASTOS, P. S. S. **Concreto protendido**. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, Bauru-SP, 2018.
- CASTRO, S. V. **Concreto Protendido - Vantagens e desvantagens dos diferentes processos de protensão do concreto nas estruturas**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- IV SELAP – Seminário Latino Americano de Protensão. Disponível em: www.selap.com.br/sobre.php. Acessado: 21 de junho de 2022.
- MELO, M. S. **ANÁLISE DA COMPETITIVIDADE ECONÔMICA ENTRE VIGAS DE CONCRETO PROTENDIDO E VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS A VÃOS DEFINIDOS**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal-RN, 2021.
- PATRICIO, J. P. **ANÁLISE COMPARATIVA DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE VIGAS ARMADAS E PROTENDIDAS**. UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA, Tubarão, 2019.

Qual o Peso de uma Barra de Ferro de Construção? Disponível em:
<https://gerenciadeobras.com.br/peso-de-uma-barra-de-ferro/#:~:text=O%20peso%20%C3%A9%20de%207%2C404kg.%20Qual%20o%20peso,Quantos%20kg%20tem%20uma%20barra%20de%208mm%3F%204%2C704kg.>