

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LARA VICTÓRIA MEOTTI DE SOUZA**

**EFEITO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NAS PERDAS DE PROTENSÃO EM  
VIGAS PÓS-TENSIONADAS**

**TOLEDO**

**2021**

**LARA VICTÓRIA MEOTTI DE SOUZA**

**EFEITO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NAS PERDAS DE PROTENSÃO EM  
VIGAS PÓS-TENSIONADAS**

**Effect of elasticity modulus on prestress losses in post-prestressed beams**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Gustavo Savaris.

**TOLEDO**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LARA VICTÓRIA MEOTTI DE SOUZA**

**EFEITO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NAS PERDAS DE PROTENSÃO EM  
VIGAS PÓS-TENSIONADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel do Curso de Engenharia Civil da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 03/dezembro/2021

---

Prof. Sérgio Antônio Brum Junior  
Doutor em Engenharia Civil  
Universidade Federal da Integração Latino Americana - UNILA

---

Prof. Rodnny Jesus Mendoza Fakhye  
Doutor em Métodos Numéricos para Engenharia  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

---

Prof. Gustavo Savaris (Orientador)  
Doutor em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

**TOLEDO**

**2021**

Dedico este trabalho ao meu avô,  
que mesmo não presente fisicamente, estava  
presente de alma.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, que me capacitou, guiou meu caminho, e me deu forças para vencer todos os obstáculos nessa jornada acadêmica.

A meu orientador e professor, Gustavo, por ter me ajudado imensamente e com sabedoria em parte de minha trajetória acadêmica, fazendo com que eu evoluísse como estudante, e por ter me orientado com paciência e dedicação, sempre acreditando em minhas capacidades, apesar de todas as dificuldades.

A todos os professores e servidores que fizeram parte de minha trajetória e formação acadêmica, de maneira muito sábia e dedicada.

Aos professores que compõem a minha banca, pela dedicação e esforço em ajudar nas melhorias deste trabalho.

Aos meus familiares, principalmente à minha mãe, Jane, que não mediu esforços, e me incentivou e apoiou, durante todos os caminhos difíceis. A minha avó, Estel, que sempre acreditou e teve orgulho de mim. Ao meu tio, Guto, que sempre me ajudou, e esteve presente quando precisei. A minha tia, Camila, que também sempre acreditou e me incentivou ao longo de minha caminhada.

Ao restante dos meus familiares, que de alguma maneira estiveram presentes, acreditaram e me incentivaram nos momentos difíceis, para a conclusão deste trabalho.

Ao meu namorado, que sempre me ajudou a vencer minhas inseguranças com paciência, e que sempre entendeu os meus momentos de ausência para dedicação neste trabalho.

Aos meus amigos que sempre estiveram comigo e acreditaram em mim.

Aos meus amigos de formação, e agora também de vida, Ana, Bruna, Alisson e Bruno, por passarem diversos momentos de conquistas, alegrias e tropeços ao longo de nossa formação acadêmica, e por me apoiarem para a realização deste trabalho.

A todos os meus colegas de classe, que de alguma forma contribuíram para a minha formação acadêmica e pessoal.

A todos que talvez não foram citados aqui, mas me ajudaram de alguma maneira, saibam que sinto enorme gratidão e felicidade por ter pessoas especiais ao meu redor.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta uma contribuição ao estudo das perdas de protensão em elementos estruturais de concreto, avaliando o efeito da variação do módulo de elasticidade, conforme agregado graúdo e classe de agressividade no concreto protendido. A perda de protensão está presente em todos os elementos que fazem uso deste sistema construtivo, estando intrinsecamente ligada aos materiais constituintes da estrutura. Portanto, as perdas de protensão apresentam grande influência no tensionamento final das cordoalhas, não podendo ser negligenciadas, devendo, assim, ser estimadas corretamente. Neste trabalho, foram avaliadas as perdas de protensão imediatas e progressivas, em vigas protendidas na pós-tração. Dois modelos foram utilizados para análise de perda de protensão, sendo uma viga de concreto protendida com cabo reto, e outra com cabo parabólico, variando-se suas classes de agressividade, agregado graúdo utilizado e dia de protensão. As perdas de protensão em vigas foram maiores em cabos parabólicos em relação às vigas com cabos retos, com mesma magnitude de excentricidade no meio do vão, e ao utilizar-se um maior módulo de elasticidade e idade de protensão, as perdas totais de protensão diminuem.

**Palavras-chave:** Vigas; Concreto protendido; Perdas; Análise numérica; Módulo de elasticidade.

## ABSTRACT

The present work presents a contribution to the study of prestress losses in structural elements of concrete, evaluating the effect of the variation of the modulus of elasticity, according to the coarse aggregate and class of aggressiveness in the concrete prestressed. The prestress loss is present in all elements that make use of this constructive system, being intrinsically linked to the materials that make up the structure. Therefore, prestress losses have a great influence on the final tensioning of the strands and cannot be neglected, and must, therefore, be correctly estimated. In this work, immediate and progressive prestress losses were evaluated in post-tension prestressed beams. Two models were used for prestress loss analysis, a prestressed concrete beam with a straight cable, and another with a parabolic cable, varying their classes of aggressiveness, coarse aggregate used and prestressing day. The prestress losses in beams were higher in parabolic cables compared to beams with straight cables, with the same magnitude of eccentricity in the middle of the span, and when using a higher modulus of elasticity and prestressing age, the total prestress losses decrease.

**Keywords:** Beams; Prestressed concrete; Losses; Numerical analysis; Young modulus.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema dos tipos, níveis e sistemas de protensão.....	20
Figura 2 - Cordoalha engraxada e não engraxada de 7 fios.....	22
Figura 3 - Constituição da bainha plástica engraxada com fios de aço.....	22
Figura 4 - Bainha metálica com cordoalhas não engraxadas. ....	23
Figura 5 – Macaco hidráulico, detalhamento e equipamento.....	24
Figura 6 - Tensão na armadura ativa de pós-tensionamento, posterior ao retrocesso da armadura de protensão. ....	27
Figura 7 - Viga de concreto protendida com cabo reto (V1).....	32
Figura 8 - Viga de concreto protendida com cabo parabólico (V2). ....	32



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de agressividade e qualidade do concreto. ....	21
Tabela 2 - Valores de $f_{ck}$ adotados conforme classe de agressividade.....	37
Tabela 3 - Módulos de elasticidade aos 15 dias conforme agregado e classe de agressividade. ....	37
Tabela 4 - Módulos de elasticidade aos 28 dias conforme agregado e classe de agressividade. ....	38
Tabela 5 - Faixa útil de aplicação da força inicial de protensão aos 15 e 28 dias. ....	38
Tabela 6 - Tensões contribuintes à perda imediata por encurtamento do concreto em V1 (MPa).....	39
Tabela 7 - Valores de $\alpha_p$ conforme classe de agressividade e agregado adotado para 15 e 28 dias.....	40
Tabela 8 - Tensões contribuintes à perda imediata por encurtamento do concreto em V2 (MPa).....	42
Tabela 9 - Perda percentual por atrito e retrocesso da ancoragem em V1 e V2 (%). ....	47
Tabela 10 - Coeficientes de fluência e retração do concreto em V1 e V2.....	51
Tabela 11 - Perdas progressivas percentuais devidas à retração e fluência do concreto em V1 e V2 no meio do vão (%). ....	52
Tabela 12 - Perdas progressivas percentuais devidas à relaxação relativa do aço em V1 e V2 no meio do vão (%). ....	53
Tabela 13 - Redução da força de protensão após 50 anos no meio do vão de V1 e V2 (%). ....	57

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Perda média percentual por encurtamento no concreto no meio do vão da V1 aos 15 dias. ....	41
Gráfico 2 – Perda média percentual por encurtamento no concreto no meio do vão da V1 aos 28 dias. ....	41
Gráfico 3 - Perda média percentual por encurtamento no concreto no meio do vão da V2 aos 15 dias. ....	43
Gráfico 4 - Perda média percentual por encurtamento no concreto no meio do vão da V2 aos 28 dias. ....	44
Gráfico 5 - Perda da força de protensão por atrito e retrocesso na ancoragem em V1 (cabo reto). ....	46
Gráfico 6 – Perda da força de protensão por atrito e retrocesso na ancoragem em V2 (cabo parabólico). ....	46
Gráfico 7 – Força de protensão ao longo do comprimento cabo após perdas imediatas na classe II, em V1 aos 15 dias. ....	48
Gráfico 8 - Força de protensão ao longo do comprimento cabo após perdas imediatas na classe II, em V2 aos 15 dias. ....	48
Gráfico 9 - Força de protensão ao longo do comprimento cabo após perdas imediatas com o agregado basáltico, em V1 aos 15 dias de protensão. ....	49
Gráfico 10 - Força de protensão ao longo do comprimento cabo após perdas imediatas com o agregado basáltico, em V1 aos 28 dias de protensão. ....	50
Gráfico 11 - Força de protensão ao longo do comprimento cabo após perdas imediatas com o agregado arenito, em V1 e V2 aos 15 e 28 dias de protensão. ....	50
Gráfico 12 – Perdas progressivas para V1 aos 15 dias de protensão no meio do vão (%). ....	55
Gráfico 13 – Perdas progressivas para V2 aos 15 dias de protensão no meio do vão (%). ....	55
Gráfico 14 – Perdas progressivas para V2 aos 28 dias de protensão no meio do vão (%). ....	55
Gráfico 15 – Perdas progressivas para V2 aos 28 dias de protensão no meio do vão (%). ....	56
Gráfico 16 – Força de protensão após perdas totais em V1 aos 15 dias nas quatro classes de agressividade com o basalto. ....	58
Gráfico 17 - Força de protensão após perdas totais em V2 aos 15 dias nas quatro classes de agressividade com o basalto. ....	58
Gráfico 18 – Força de protensão após perdas totais em V2 aos 15 e 28 dias de protensão. ....	59
Gráfico 19 – Força de protensão após perdas totais em V1 aos 15 e 28 dias de protensão. ....	60
Gráfico 20 - Força de protensão após perdas totais em V1 e V2 aos 28 dias de protensão. ....	61

<b>Gráfico 21 - Força de protensão após perdas totais em V1 e V2 aos 15 e 28 dias de protensão.....</b>	<b>61</b>
---	-----------

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CA	Concreto armado convencional
CG	Centro de gravidade
CP	Concreto protendido
$E_p$	Módulo de elasticidade do aço de protensão
$E_{ci}$	Módulo de elasticidade inicial do concreto
ELS	Estado limite de serviço
$F_{ck}$	Resistência característica à compressão
$F_{tpk}$	Resistência característica à tração
$P_i$	Força inicial de protensão
$P_0$	Força de protensão após perdas imediatas
$\Delta P_{(x)}$	Perda por atrito ao longo do comprimento do cabo
$x$	Ponto da abcissa a partir da ancoragem
$\sum \alpha$	Soma dos ângulos de desvio da ancoragem a partir do ponto de abcissa
$\mu$	Coefficiente de atrito entre bainha e cabo
$K$	Perda por metro das curvaturas que não são intencionais que ocorrem no cabo
$\Delta \sigma_p$	Perda média de protensão por cabo, gerada por conta do encurtamento elástico do concreto
$\sigma_{cp}$	Tensão no concreto no nível do centro de gravidade da armadura ativa
$\sigma_{cg}$	Tensão no concreto no nível do baricentro da armadura protendida, gerada pela carga permanente
$\alpha_p$	Razão entre o módulo de elasticidade do concreto e do módulo de elasticidade do aço de protensão
$n$	Quantidade de cabos que compõe a armadura ativa
$\sigma_p$	Tensão de protensão atuante na seção do compósito
$X$	Posição da seção ao longo do comprimento da estrutura
$\sigma_{pi}$	Tensão aplicada pelo equipamento tensionante
$\sigma_{pi,2}$	Tensão após o escorregamento
$\Delta \sigma_{p,anc}$	Queda de tensão na ancoragem ativa
$\sigma_{pX}$	Tensão no posicionamento X
$\Delta \sigma_{p,méd}$	Perda de tensão média na distância X
$\delta$	Retrocesso da ancoragem

$\lambda$	Inclinação da reta
$\Delta\sigma_{P,c+s}(t, t_0)$	Perda de tensão da armadura ativa que é provocada pela retração e fluência do concreto
$(t, t_0)$	Intervalo de tempo em que estão sendo estudadas as perdas
$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$	Retração no instante $t$ , diminuída a retração ocorrente até o instante $t_0$
$\varphi(t, t_0)$	Coeficiente de fluência do concreto no instante $t$ , para a carga permanente e a protensão, sendo aplicadas no tempo $t_0$
$\sigma_{cp0}$	Tensão no concreto na direção do cabo resultante
$\sigma_{cgi}$	Tensão no concreto na armadura ativa, ocorrente por conta do carregamento $g_i$
$\sigma_{p0}$	Tensão na armadura ativa devido à força inicial de protensão
$\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)$	Perda por relaxação pura do aço
$ \Delta\sigma_{P,c+s}(t, t_0) $	Perda de tensão no aço, em módulo, devido à retração e fluência do concreto
$M_0$	Momento fletor gerado apenas pelo peso próprio da estrutura
$f_{ct,0}$	Resistência do concreto à tração no instante 0
$f_{cc,0}$	Resistência à compressão do concreto no instante 0
$A$	Área da seção transversal da peça
$\alpha_{base}$	Razão entre a área multiplicada pela distância a linha neutra da base do elemento cimentício, sobre o momento de inércia da peça
$\alpha_{top}$	Razão entre a área multiplicada pela distância a linha neutra do topo do elemento cimentício, sobre o momento de inércia da peça
$P_{m0}$	Força de protensão solicitada pelas tensões no estado elástico
$M_T$	Momento fletor gerado por todas as cargas ao longo do tempo na estrutura
$f_{ct,t}$	Resistência do concreto à tração no instante $t$
$f_{cc,t}$	Resistência à compressão do concreto no instante $t$
$\Omega$	Coeficiente de perda de protensão
$f_{cd}$	Resistência de cálculo do concreto
$f_{ptk}$	Resistência característica à tração da cordoalha
$f_{pyk}$	Resistência ao escoamento da cordoalha
$\alpha_E$	Indicador utilizado em função da origem natural do agregado utilizado no concreto
$s$	Coeficiente conforme classe do Cimento Portland
$f_{ckj}$	Força característica à compressão no dia $j$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Protensão em estruturas de concreto</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Tipos de protensão</b> .....	<b>18</b>
<b>2.3</b>	<b>Materiais utilizados no concreto protendido</b> .....	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>Perdas de protensão</b> .....	<b>24</b>
<b>2.5</b>	<b>Perdas imediatas da força de protensão</b> .....	<b>24</b>
2.5.1	Perda por atrito .....	25
2.5.2	Perda por encurtamento elástico imediato do concreto .....	25
2.5.3	Perda por retrocesso na ancoragem .....	26
<b>2.6</b>	<b>Perdas progressivas</b> .....	<b>29</b>
2.6.1	Perda por retração do concreto .....	29
2.6.2	Perda por fluência .....	29
2.6.3	Perda por relaxação do aço de protensão .....	30
2.6.4	Determinação das perdas progressivas .....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Modelo de viga analisada</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais para protensão</b> .....	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Variáveis analisadas</b> .....	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>Determinação das perdas de protensão</b> .....	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Módulos de elasticidade</b> .....	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>Pré-dimensionamento da força de aplicação da protensão</b> .....	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>Perdas imediatas</b> .....	<b>39</b>
4.3.1	Cálculo da perda por encurtamento do concreto .....	39
<u>4.3.1.1</u>	<u>Cálculo da perda por encurtamento do concreto em V1</u> .....	<u>39</u>
<u>4.3.1.2</u>	<u>Cálculo da perda por encurtamento do concreto em V2</u> .....	<u>42</u>
<u>4.3.1.3</u>	<u>Comparativo da perda por encurtamento do concreto entre V1 e V2</u> .....	<u>44</u>
4.3.2	Cálculo da perda por atrito e por retrocesso da ancoragem .....	45
<b>4.4</b>	<b>Determinação da força total de protensão e comparativos após perdas imediatas</b> .....	<b>47</b>
<b>4.5</b>	<b>Perdas Progressivas</b> .....	<b>51</b>
4.5.1	Determinação das perdas progressivas .....	51

<u>4.5.1.1</u>	<u>Perdas advindas da retração e fluência do concreto.....</u>	<u>51</u>
<u>4.5.1.2</u>	<u>Perdas advindas da relaxação do aço de protensão.....</u>	<u>53</u>
<u>4.5.1.3</u>	<u>Perdas progressivas totais .....</u>	<u>54</u>
4.5.2	Determinação e análise da força de protensão no final da vida útil da estrutura.....	56
<u>4.5.2.1</u>	<u>Comparativo entre as combinações de vigas estudadas após todas as perdas.....</u>	<u>58</u>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE A - Resultados das perdas imediatas .....</b>	<b>68</b>
	<b>APÊNDICE B - Resultados das perdas progressivas.....</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE C - Resultados perdas totais.....</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O surgimento do concreto protendido (CP) está datado em meados do fim do século 19 e inicialmente pouco êxito era obtido com esse método construtivo, devido à grande perda de protensão no decorrer do tempo. Os primeiros estudos consistentes sobre a perda de protensão no CP surgiram na década de 1920, apresentados por Eugène Freyssinet, na França, levando em conta as perdas de protensão geradas pela deformação e retração do concreto, que demonstrou ser possível minimizar tais perdas com elevadas tensões na armadura de aço. Sendo assim, Freyssinet é considerado como um dos principais desenvolvedores da tecnologia do concreto protendido, patenteando também diversos métodos construtivos, materiais, colaborando, dessa forma expressivamente para o avanço do concreto protendido (VERÍSSIMO; CÉSAR, 1998a; LIMA, 2001).

A primeira obra de concreto protendido executada no Brasil foi no ano de 1948, a ponte do Galeão, no Rio de Janeiro. A ponte possuía 380 metros de extensão, contando com o sistema Freyssinet, sendo todos os seus componentes importados da França, desde os materiais até o projeto. Os cabos utilizados para protender a ponte eram constituídos de aço envoltos em duas camadas de papel *Kraft*, pintados com betume, sendo assim, o concreto era protendido sem aderência. Nos anos posteriores ocorreu o início de conferências tendo como tema o concreto protendido e também surgimento de normatizações para esse método construtivo sendo difundido pelo mundo inteiro (CARVALHO et al., 2005).

A quantidade de construções fazendo uso do concreto protendido tornou-se enorme e certamente continuará a aumentar. O engenheiro estrutural contemporâneo deve aprender e utilizar todas as facetas do concreto protendido (LIBBY, 1990).

Considerando que o concreto possui elevada resistência à compressão, porém baixa resistência à tração, a protensão do elemento estrutural de concreto produz tensões de compressão, uniformes ou não, que neutralizam as tensões de tração induzidas por carregamentos externos (NAAMAN, 2004).

Ao longo de sua vida útil o CP sofre perda de tensionamento em sua armadura ativa, dessa forma as estimativas dessas perdas devem ser calculadas e previstas, pois otimizam e apresentam maior economia e segurança nos projetos dos elementos protendidos (FREITAS; MOURA; REAL, 2018).



O presente trabalho apresenta uma contribuição ao estudo das perdas de protensão em elementos estruturais de concreto, avaliando o efeito da variação do módulo de elasticidade, conforme o agregado graúdo e classe de agressividade considerados para o concreto protendido, conforme as especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

## **1.1 Justificativa**

A utilização do concreto protendido está consagrada no Brasil desde as últimas décadas, sendo uma técnica construtiva amplamente utilizada, e isso pode comprovar-se através das inúmeras construções civis realizadas, que vão de silos à tanques, pontes e viadutos, e também edifícios dos mais variados tipos (VERÍSSIMO; CÉSAR, 1998a).

A perda de protensão está presente em todos os elementos que fazem uso deste método construtivo, estando intrinsecamente ligadas aos materiais constituintes da estrutura, em que o nível de força aplicado é reduzido imediatamente e também ao passar do tempo, estando correlacionadas com a retração e a fluência do concreto, e também a relaxação do aço de protensão. Portanto as perdas de protensão apresentam grande influência no tensionamento final das cordoalhas, não podendo ser negligenciadas, devendo assim ser estimadas corretamente para que haja o dimensionamento coerente da força inicial de protensão e da quantidade de cordoalhas utilizadas na estrutura protendida (TAVARES, 2020).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência do módulo de elasticidade e da classe de agressividade do concreto na perda de protensão em vigas pós-tensionadas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Comparar as perdas de protensão em 64 vigas de traçado curvo e reto, de seção transversal retangular, considerando protensão em idades de 15 e 28 dias;
- Avaliar a influência do tipo de agregado graúdo empregado no concreto nas perdas de protensão imediatas e progressivas;
- Avaliar a influência da classe de agressividade do ambiente nas perdas de protensão imediatas e progressivas;
- Comparar as perdas de protensão em vigas com cabos em traçado curvo e reto.

### 1.2.3 Delimitação da pesquisa

Neste trabalho foram comparados os resultados obtidos para vigas protendidas pós-tracionadas sem aderência, de traçado curvo e reto, contando com mesma seção transversal, seguindo as recomendações de dimensionamento estabelecidas na norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014).

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Protensão em estruturas de concreto**

Utilizar a protensão em uma estrutura de concreto é a possibilidade de adoção de um sistema eficaz, que através da aplicação de forças externas em suas armaduras ativas nas seções fletidas ou tracionadas do concreto, apresenta melhoria em seu desempenho. Portanto esse sistema construtivo permite o aproveitamento otimizado das resistências mecânicas dos materiais que o compõem, aumentando assim a resistência do elemento, reduzindo as deformações e fissurações, propiciando também conforto e segurança elevados, e vida útil longa aos seus componentes (NAAMAN, 2004; BONILHA; CHOLFE, 2013; SCHMID, 2013).

A utilização conjunta do aço e do concreto proporciona que o aço resista às solicitações de tração e o concreto às de compressão, isto sendo no concreto armado (CA). Já no CP, são aplicadas tensões de compressão na seção transversal de vigas, impedindo ou limitando o surgimento de esforços de tração no concreto da estrutura (VERÍSSIMO; CÉSAR, 1998a).

### **2.2 Tipos de protensão**

Nas estruturas de CP são empregadas armaduras ativas, aquelas que são dispostas internas ou externamente ao concreto e sofrem tensionamento, cumprindo a função de transmitir esforços de compressão ao concreto e, em alguns casos, auxiliando na restrição da abertura de fissuras (HANAI, 2005).

Os métodos de protensão utilizados podem ser classificados de acordo com a fase em que ocorre o alongamento da armadura ativa (HANAI, 2005):

Na primeira técnica, denominada pré-tração, os fios ou cordoalhas de aço são instaladas nas formas e tracionada até uma tensão pré-determinada, sendo ancoradas em anteparas ou moldes fixos. O concreto então é despejado nas formas e após o tempo de cura as armaduras ancoragens são liberadas (NAAMAN, 2004). Nos casos de pré-tração, a transferência da força de protensão ao concreto é dada através da aderência entre o concreto e a armadura, trabalhando como elemento

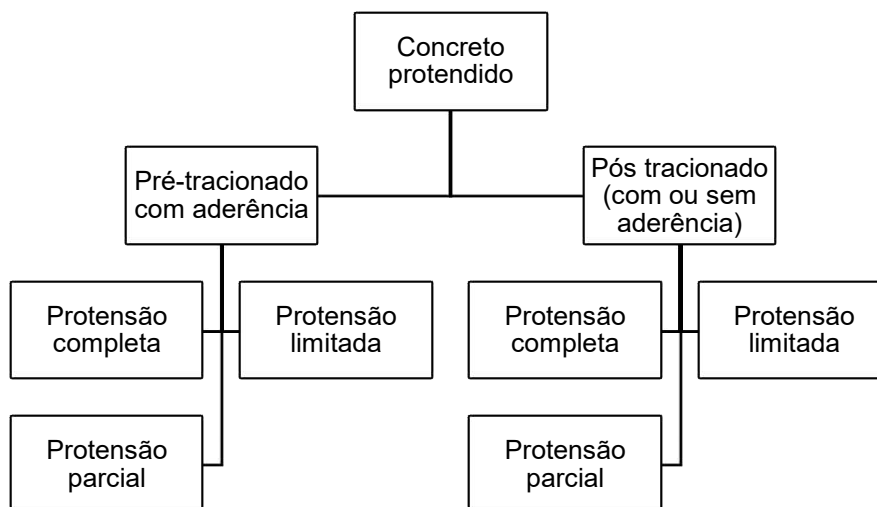
estrutural único, sendo assim chamado de concreto protendido com aderência inicial (BASTOS, 2018).

No segundo método, denominado pós-tração, as cordoalhas são alojadas e concretadas dentro de bainhas, sem contato direto com o concreto, sendo tensionadas apenas após a cura do concreto, e neste método as tensões são transmitidas a partir das ancoragens nas extremidades (NAAMAN, 2004; CARVALHO et al., 2005). Nos casos da pós-tração essa aderência posterior pode ou não estar presente, o que ocasiona a diferenciação é se a bainha utilizada na transferência da força de protensão foi ou não preenchida com nata de cimento (BASTOS, 2018).

Dependendo também das tensões finais na seção transversal, três níveis de protensão em uma estrutura de concreto protendido podem ser definidos, devendo ser escolhidos conforme a agressividade do meio ambiente em que a estrutura se encontra. A protensão completa ou total é utilizada em ambientes que estão contidos em agressividade elevada, sendo geralmente em classes de agressividade III e IV, para peças pré-tracionadas, demonstrando desempenho efetivo na proteção das armaduras contra a corrosão, e concomitantemente controle elevado para fissurações geradas através da fluência do concreto. A protensão limitada é recomendada em ambientes que estejam nas classes de agressividade II, para armaduras ativas pré-tracionadas, ou na classe III e IV para pós-tracionadas, fazendo uso de armadura passiva para o controle de fissuração, pois ocorrem solicitações de tração na peça. O nível de protensão parcial possui comportamento semelhante ao de protensão limitada, porém permite valores mais elevados de tensões de tração no concreto, resultando em fissuras de maior abertura, devendo ser respeitado o limite imposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014) de 0,2mm (VERÍSSIMO; CÉSAR, 1998a; CARVALHO et al., 2005).

A Figura 1 demonstra os tipos, níveis e sistemas de protensão:

**Figura 1 - Esquema dos tipos, níveis e sistemas de protensão.**



**Fonte: Carvalho et al. (2005).**

Pode-se notar através da Figura 1 que para o sistema de armadura ativa pré-tracionada apenas ocorre transferência da força de protensão com aderência, e para o sistema de transferência pós-tracionada pode ou não ocorrer aderência. Os níveis de protensão estão presentes em todos os patamares em ambos os métodos.

### **2.3 Materiais utilizados no concreto protendido**

A norma brasileira que rege os procedimentos para o projeto de estruturas de concreto protendido, NBR 6118 (ABNT, 2014), apresenta a Tabela 1 que demonstra a relação entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

**Tabela 1 - Classes de agressividade e qualidade do concreto.**

Concreto <sup>a</sup>	Tipo <sup>b,c</sup>	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação Água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

<sup>a</sup> O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

<sup>b</sup> CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

<sup>c</sup> CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

**Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).**

Conforme a classe de agressividade do ambiente onde a estrutura será inserida, a norma define diferentes relações de água/cimento e classes de resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ), demonstrando a necessidade de maior resistência em comparação ao CA, iniciando na classe com resistência à compressão axial característica igual a 25 MPa.

Comumente a resistência à compressão característica do concreto ( $f_{ck}$ ) para uso em estruturas protendidas está contido na faixa entre 30 e 50 MPa, pois as solicitações preliminares causadas pela força de protensão são elevadas. A utilização de concreto com  $f_{ck}$  nessa faixa apresenta elevado módulo de elasticidade, que, por conseguinte, reduz as flechas, proporcionando estruturas mais leves de maneira que haja diminuição de seu peso próprio, diminuindo suas seções transversais e permitindo vencer maiores vãos (BASTOS, 2018).

As armaduras passivas suplementares são as mesmas utilizadas no concreto armado convencional, com aço produzido de acordo com as especificações da norma NBR 7480 (ABNT, 2007), contando com barras de CA-25, CA-50 e fios de CA-60, dispendo de resistências de início de escoamento em cerca de 250, 500 e 600 MPa, respectivamente (CARVALHO et al., 2005).

O aço de armadura ativa do CP pode ser formado por fios com diâmetro de 3 a 8 mm ou cordoalhas (com 2, 3 ou 7 fios). Na Figura 2 são apresentadas cordoalhas engraxadas e não engraxadas de 7 fios, e na Figura 3 é apresentada a bainha engraxada utilizada para o pós-tensionamento sem aderência, sendo especificadas pelas normas da NBR 7482 (ABNT, 2020), NBR 7483 (ABNT, 2021).

**Figura 2 - Cordoalha engraxada e não engraxada de 7 fios.**



Fonte: Catálogo ArcelorMittal (2021).

**Figura 3 - Constituição da bainha plástica engraxada com fios de aço.**



Fonte: Carvalho et al (2005).

O aço desse tipo de armadura é caracterizado por sua elevada resistência ao escoamento, sendo essa solicitada devido aos grandes estiramentos em regime elástico e para compensação de perdas de protensão, apresentando também de boas especificidades de aderência, ductilidade antes de sua ruptura, pequena relaxação e elevada resistência à fadiga e corrosão. Portanto são utilizados para a fabricação de fios e cordoalhas aços com resistência característica à tração ( $f_{ptk}$ ) em cerca de 1750 MPa (CP 175) e 1900 MPa (CP 190), e 2100 MPa (CP 210) (CARVALHO et al., 2005; BASTOS, 2018).

Esse aço de armadura ativa possui dois tipos de tratamento em sua trefilação, tornando-o de relaxação normal (RN), que passa por tratamento térmico diminuindo suas tensões internas de trefilação, ou de baixa relaxação (RB), sendo aços estabilizados em que recebem melhoramento em suas características elásticas e redução de perdas de tensionamento por relaxação do aço (HANAI, 2005).

Ocorre também a diferenciação do tipo de armadura ativa utilizada no CP para com o tipo de aderência utilizado, como a exemplo no caso de CP sem aderência e pós-tracionado, faz-se o uso de cordoalhas engraxadas. No CP com pré e pós tracionamento e com aderência utilizam-se cordoalhas não engraxadas posicionadas dentro de bainhas metálicas (Figura 4), e após a cura do concreto o aço é tracionado, ocorrendo posteriormente injeção de nata de cimento, criando aderência entre o aço e a bainha (CARVALHO et al., 2005).

**Figura 4 - Bainha metálica com cordoalhas não engraxadas.**



Fonte: Bastos (2018).

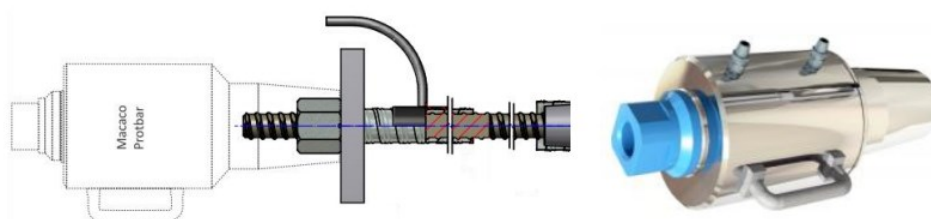
Essa categoria de aço de armadura ativa possui dois tipos de tratamento em sua trefilação, tornando-o de relaxação normal (RN), que passa por tratamento térmico diminuindo suas tensões internas de trefilação, ou de baixa relaxação (RB), sendo aços estabilizados em que recebem melhoramento em suas características elásticas e redução de perdas de tensionamento por relaxação do aço (HANAI, 2005).

Os artifícios utilizados para a fixação dos cabos de protensão a serem tensionados são as ancoragens, podendo ser passiva ou ativa, em que a primeira é a que não recebe tensionamento do equipamento hidráulico e a última é que recebe o estiramento, possuindo a função de manter a carga transferida do macaco hidráulico, causando o travamento do cabo, para que ele não volte ao seu estado inicial, sem tensão. Pode ser elencado: ancoragem por aderência de extremidade, com o concreto, ancoragem de fios lisos utilizando-se de curvaturas e atrito, e ancoragens de extremidade através de dispositivos, em que a armadura de protensão é travada por meio de placas de aço, porcas, cunhas, roscas, cabeçotes apoiados em calços de aço, ou equipamentos similares (VERÍSSIMO; CÉSAR, 1998a; LIMA, 2001).



Para a aplicação das forças externas nos concretos protendidos, são utilizados macacos hidráulicos (Figura 5) que transmitem aos cabos de protensão uma tensão elevada, gerando compressão em toda a seção do elemento estrutural. A força de protensão é obtida através da pressão hidráulica que atua sobre o pistão presente no interior do equipamento, fazendo com que o haja o estiramento do cabo de protensão, transmitindo então uma tensão que gera a protensão no elemento estrutural (LIMA, 2001).

**Figura 5 – Macaco hidráulico, detalhamento e equipamento.**



**Fonte: Catálogo Protbar (2021).**

## **2.4 Perdas de protensão**

As perdas de protensão podem ser definidas como as reduções que ocorrem na força inicial de protensão ( $P_i$ ) aplicada nas cordoalhas pelo macaco hidráulico e a força que permanece no elemento estrutural protendido durante sua vida útil. O projeto deve antecipar o cálculo das perdas de protensão em comparação ao seu valor inicial, transferidas pelo equipamento tensor, ocorrendo antes e durante essa aplicação, chamadas de perdas iniciais ou imediatas; e durante o ciclo de vida da estrutura, sendo as perdas progressivas (BONILHA; CHOLFE, 2013; FREITAS; MOURA; REAL, 2018).

## **2.5 Perdas imediatas da força de protensão**

As perdas imediatas são aquelas que ocorrem no intervalo de tempo em que está ocorrendo à transferência de força para as seções transversais de concreto. Assim sendo, engloba a perda por atrito, encurtamento imediato do concreto e a perda por escorregamento na ancoragem (BONILHA; CHOLFE, 2013).

### 2.5.1 Perda por atrito

As perdas devidas ao atrito decorrem apenas nas peças protendidas com pós-tensionamento, e não são uniformes ao longo da peça, sendo resultante do atrito entre o contato entre os cabos com a bainha na aplicação da força de protensão. Esse atrito demonstra-se elevado nos pontos curvos da trajetória do cabo dentro do elemento estrutural, pois surgem pontos de pressão de contato induzido por conta do desvio da trajetória do cabo (VERÍSSIMO; CÉSAR, 1998b).

A perda por atrito pode ser determinada seguindo as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014):

$$\Delta P_{(x)} = P_i \left[ 1 - e^{-(\mu \sum \alpha + Kx)} \right] \quad (1)$$

Onde:

$\Delta P_{(x)}$  é a perda por atrito ao longo do comprimento do cabo em kN;

$P_i$  é a força inicial de protensão em kN;

$x$  é o ponto da abscissa calculada  $\Delta P$ , a partir da ancoragem e expressa em metros (m);

$\sum \alpha$  a soma dos ângulos a partir do ponto de abscissa  $x$  e desvio entre a ancoragem, expressa em radianos (rad);

$\mu$  é o coeficiente de atrito entre bainha e cabo sendo utilizado 0,05;

$K$  é o coeficiente que expressa a perda por metro das curvaturas que não são intencionais que ocorrem no cabo, expresso por metro (1/m).

### 2.5.2 Perda por encurtamento elástico imediato do concreto

O encurtamento elástico do concreto, e consequente perda imediata devida a esse fenômeno, estão presentes na pré e pós-tração. No caso da pré-tração, quando os cabos são liberados da ancoragem a força de protensão é transferida ao concreto gerando uma deformação imediata por compressão, resultando no encurtamento dos cabos protendidos. Já na pós-tração, a perda ocorre somente quando há protensão sequencial dos cabos, pois o macaco hidráulico fixado na ancoragem dos cabos aplica

por reação a força de compressão, gerando uma parcela de perda de protensão nos cabos já ancorados (VERÍSSIMO; CÉSAR, 1998b).

A perda média de protensão, por cabo, devido ao encurtamento do concreto pode ser calculada conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014):

$$\Delta_{\sigma p} = \frac{\alpha p (\sigma_{cp} + \sigma_{cg}) (n-1)}{2n} \quad (2)$$

Em que:

$\Delta_{\sigma p}$  é a perda média de protensão por cabo, gerada por conta do encurtamento elástico do concreto expressa em MPa;

$\sigma_{cp}$  é a tensão no concreto no nível do centro de gravidade (CG) da armadura ativa em MPa;

$\alpha p$  é a razão entre o módulo de elasticidade do concreto e do módulo de elasticidade do aço de protensão, no dia da transferência;

$n$  é a quantidade de cabos que compõe a armadura ativa;

$\sigma_{cg}$  é a tensão no concreto no nível do baricentro da armadura protendida, gerada pela carga permanente instigada pela protensão ou juntamente ocorrente com o tensionamento em MPa.

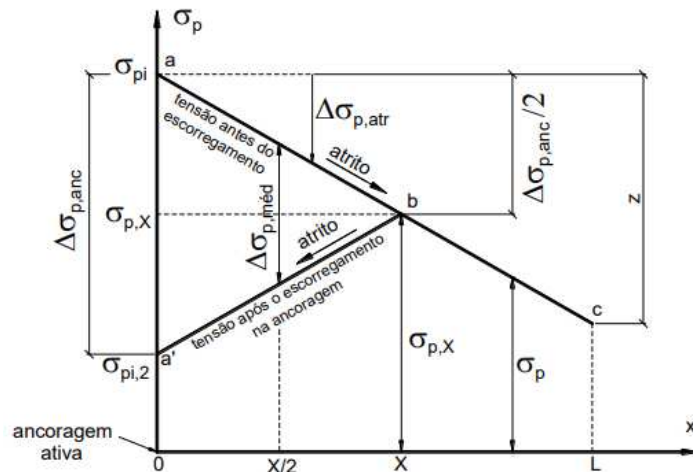
### 2.5.3 Perda por retrocesso na ancoragem

As perdas advindas da acomodação das ancoragens ocorrem na pós-tração, devido ao retrocesso que o cabo sofre após a aplicação da força de protensão, com o retrocesso das cunhas que causam seu travamento nas extremidades do elemento estrutural, fazendo com que ocorra diminuição do alongamento inicial do cabo, perdendo protensão (FREITAS; MOURA; REAL, 2018).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) não apresenta procedimento de cálculo para tal diminuição da força de protensão, apenas explicita que a perda por retrocesso na ancoragem deve ser determinada através de valores empíricos, ou valores disponibilizados pelos fabricantes dos dispositivos que realizam a ancoragem.

Portanto, para a determinação da perda por retrocesso na ancoragem, Bastos (2019) apresenta um método iterativo. Como as forças providas do atrito que são atuantes no estiramento e no retrocesso da ancoragem são de mesma magnitude, elas possuem retas de perda de tensão com mesma inclinação, porém opostas e formando, assim um triângulo isósceles, como mostra a Figura 6.

**Figura 6 - Tensão na armadura ativa de pós-tensionamento, posterior ao retrocesso da armadura de protensão.**



Fonte: Bastos (2019).

Onde:

$\sigma_p$  é a tensão de protensão atuante na seção do compósito;

$X$  é a posição da seção ao longo do comprimento da estrutura;

$\sigma_{pi}$  é a tensão aplicada pelo equipamento tensionante;

$\Delta\sigma_{p,anc}$  é a queda de tensão na ancoragem ativa.

Os segmentos de reta  $ab$  e  $a'b$ , com inclinações iguais, porém opostas, formam o triângulo  $aa'b$ . Para a determinação desses segmentos faz-se necessária o cálculo da queda de tensão na ancoragem, através de uma distância  $X$  da ancoragem.

$$\Delta\sigma_{p,anc} = \sigma_{pi} - \sigma_{pi,2} = 2(\sigma_{pi} - \sigma_{pX}) = 2(\Delta\sigma_{p,méd}) \quad (3)$$

Em que:

$\sigma_{pi,2}$  é a tensão após o escorregamento;

$\sigma_{pX}$  é a tensão no posicionamento  $X$ ;

$\Delta\sigma_{p,anc}$  é a queda de tensão na ancoragem ativa;

$\Delta\sigma_{p,méd}$  é a perda de tensão média na distância X.

$$\Delta\sigma_{p,méd} = \sigma_{pi} - \sigma_{pX} = \sigma_{pi} - \lambda X \quad (4)$$

Considerando um retrocesso  $\delta$  na ancoragem, pode ser considerado que a armadura ativa passa por um encurtamento de igual magnitude através da distância X, sendo a perda média de deformação.

$$(\Delta\varepsilon_p) = \frac{\delta}{X} \quad (5)$$

Onde:

$\Delta\varepsilon_p$  é a perda média de deformação;

$\delta$  é o retrocesso da ancoragem;

Através da Lei de Hooke, e aplicando na Equação 05, tem-se a perda média de deformação:

$$(\Delta\sigma_{p,méd}) = E_p \frac{\delta}{X} \quad (6)$$

É encontrada a perda de tensão média na posição X,  $\Delta\sigma_{p,méd}$  :

$$\Delta\sigma_{p,méd} = \sigma_{pi} - \lambda X \quad (7)$$

Utilizando as equações 3, 6 e 7, tem-se:

$$\Delta\sigma_{p,anc} = 2E_p \frac{\delta}{X} = 2\sigma_{pi}\lambda X \quad (8)$$

Onde:

$E_p$  é o módulo de elasticidade do aço em MPa;

$\sigma_{pi}$  é a tensão aplicada pelo equipamento tensionante em MPa;

$\delta$  é o retrocesso da ancoragem em mm;

$\lambda$  seja a inclinação da reta em N/mm;

$\Delta\sigma_{p,anc}$  é a queda de tensão na ancoragem ativa expressa em MPa.

Para encontrar o valor de X, posição onde o escorregamento da armadura é nulo, utiliza-se a Equação 8, isolando o termo X.

$$X = \sqrt{\frac{E_p \delta}{\sigma_{pi\lambda}}} \quad (9)$$

Então a partir do valor calculado na Equação 9, encontra-se a perda de protensão da armadura ativa a partir da Equação 8.

## 2.6 Perdas progressivas

As perdas progressivas são aquelas que ocorrem após a transferência da força de protensão, ao longo da vida útil da estrutura de CP. Estão contidas nesse conjunto as perdas devidas à retração e fluência do concreto e à relaxação da armadura ativa de aço (FREITAS; MOURA; REAL, 2018).

### 2.6.1 Perda por retração do concreto

A retração do concreto ocorre devido ao balanceamento de umidade do material com o meio ambiente, quando o compósito cimentício acaba perdendo parte de sua água de amassamento. Nas primeiras idades esse processo é acelerado, mas gradativamente com o envelhecimento do concreto ele se torna estável. Essa perda gera encurtamento do concreto, manifestando-se ao longo do tempo. Esse encurtamento ocorre com a mesma magnitude nos cabos protendidos, gerando a perda de protensão (VERÍSSIMO; CÉSAR, 1998b).

### 2.6.2 Perda por fluência

A fluência do concreto pode ser definida como o aumento de deformação ao passar do tempo, quando a estrutura é submetida a uma carga constante. Sendo inversamente proporcional à resistência do concreto e relacionada à carga aplicada. Dessa forma, por conta da aplicação de cargas de compressão no compósito protendido, esse fenômeno causa o encurtamento do concreto no entorno das armaduras ativas, gerando diminuição da força de protensão (FREITAS; MOURA; REAL, 2018).

### 2.6.3 Perda por relaxação do aço de protensão

O alívio de tensão que ocorre ao longo do tempo na armadura de aço, após seu alongamento com comprimento e carregamentos constantes, é chamado de relaxação do aço (VERÍSSIMO; CÉSAR, 1998b).

### 2.6.4 Determinação das perdas progressivas

Para a determinação das perdas progressivas quando a protensão não ocorre juntamente com a aplicação das ações permanentes a NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda a utilização do método geral de cálculo, devendo ser avaliada a fluência nas camadas de concreto e a relaxação por cabo tracionado.

Neste método utiliza-se a Fórmula Derivada do Método da Tensão Média (Equação 10), para determinação das perdas advindas da retração e fluência do concreto, pois são fenômenos que interagem entre si e ocorrem mutuamente, e a relaxação isolada de cada cabo, como presente na NBR 6118 (ABNT, 2014) (BONILHA; CHOLFE, 2013).

$$\Delta\sigma_{P,c+s}(t, t_0) = \frac{[(\varepsilon_{cs}(t, t_0) \cdot E_p + \alpha_p \cdot \varphi(t, t_0) \cdot (\sigma_{cP0} + \sigma_{cg})) + \alpha_p \cdot \sum_i [\Delta\sigma_{cgi} \cdot \varphi(t, t_0)]]}{\left[1 - \alpha_p \cdot \left(\frac{\sigma_{cP0}}{\sigma_{P0}}\right) \cdot \left(1 + \frac{\varphi(t, t_0)}{2}\right)\right]} \quad (10)$$

Onde:

$\Delta\sigma_{P,c+s}(t, t_0)$  seja perda de tensão da armadura ativa que é provocada pela retração e fluência do concreto (MPa);

$(t, t_0)$  intervalo de tempo em que estão sendo estudadas as perdas;

$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$  é a retração no instante  $t$ , diminuída a retração ocorrente até o instante  $t_0$ ;

$E_p$  o módulo de elasticidade do aço (MPa);

$E_c$  o módulo de elasticidade do concreto (MPa);

$\alpha_p$  a razão entre o módulo de elasticidade do aço e o módulo de elasticidade do concreto;

$\varphi(t, t_0)$  é o coeficiente de fluência do concreto no instante  $t$ , para a carga permanente e a protensão, sendo aplicadas no tempo  $t_0$ ;

$\sigma_{cp0}$  seja a tensão no concreto na direção do cabo resultante, no qual é resultante da protensão e carga permanente no instante  $t_0$ , positiva no caso compressão (MPa);

$\sigma_{cg}$  seja a tensão no concreto na armadura ativa, ocorrente por conta das ações permanentes geradas pela protensão (MPa);

$\sigma_{cgi}$  seja a tensão no concreto na armadura ativa, ocorrente por conta do carregamento  $g_i$ , aplicado nas idades posteriores (MPa);

$\sigma_{p0}$  tensão na armadura ativa devido à força inicial de protensão (MPa);

A perda por relaxação pura é determinada experimentalmente em laboratório, e a perda por relaxação relativa, que realmente ocorre na estrutura, é estimada por processo aproximado (BONILHA; CHOLFE, 2013):

$$\Delta\sigma_{pr}(t, t_0), rel = \Delta\sigma_{pr}(t, t_0) \cdot \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{|\Delta\sigma_{p,c+s}(t, t_0)|}{\sigma_{pi}}\right)\right] \quad (11)$$

Em que:

$\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)$  é a perda por relaxação pura do aço;

$|\Delta\sigma_{p,c+s}(t, t_0)|$  seja a perda de tensão no aço, em módulo, devido à retração e fluência do concreto;

$\sigma_{pi}$  é a tensão no aço contando o efeito das ações permanentes.



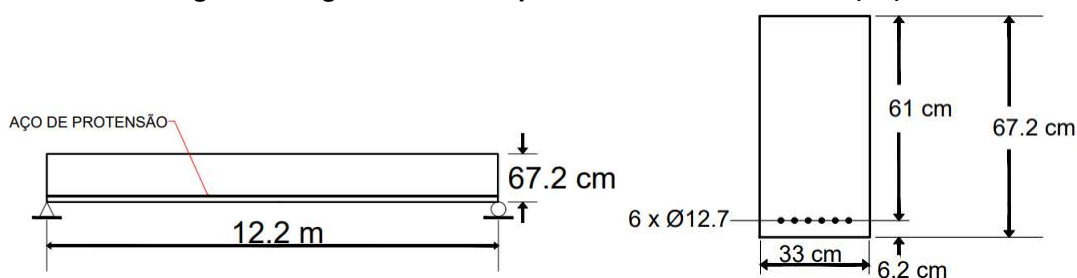
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram avaliadas as perdas da força de protensão, imediatas e progressivas, em vigas de concreto protendido na pós-tração foram calculadas segundo as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

#### 3.1 Modelo de viga analisada

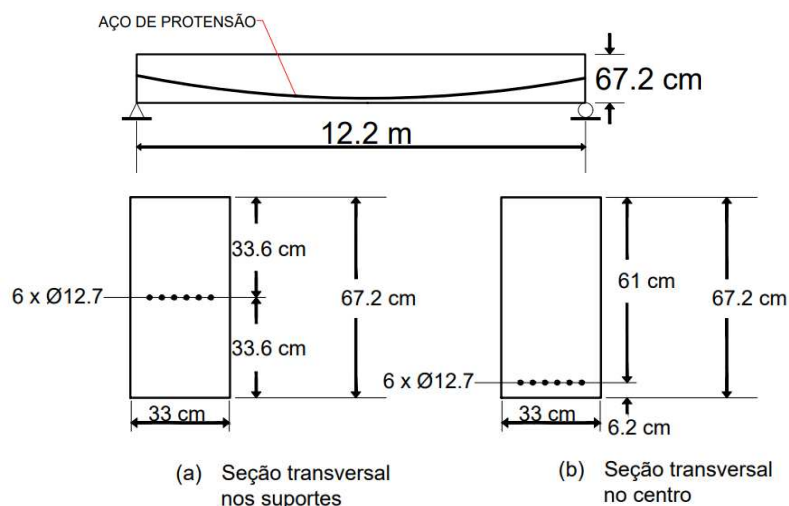
Dois modelos foram utilizados para análise de perda de protensão, sendo uma viga de concreto protendida com cabo reto (V1) (Figura 7), e outra viga de concreto protendida com cabo parabólico (V2) (Figura 8), sendo adaptadas de Hsiao (2016), devido ao seu cobrimento, para atender os requisitos impostos pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

**Figura 7 - Viga de concreto protendida com cabo reto (V1).**



Fonte: Adaptado de Hsiao (2016).

**Figura 8 - Viga de concreto protendida com cabo parabólico (V2).**



Fonte: Adaptado de Hsiao (2016).

### 3.2 Materiais para protensão

Para o pós-tensionamento sem aderência foram consideradas seis monocordoalhas em bainha engraxada e plastificada de 7 fios CP 190 RB, conforme especificações do catálogo da ArcelorMittal (2021), com diâmetro de 12,7 mm; seção nominal com área de 101 mm<sup>2</sup>; módulo de elasticidade aproximado de 195.000 MPa; carga mínima de ruptura de 187 kN; carga mínima à 1% de deformação 169 kN; alongamento após ruptura de 3,5%.

O pré-dimensionamento da força de protensão, baseou-se na análise das tensões em estado elástico do elemento estrutural, levando em conta o  $f_{ck}$  do concreto nas idades de 15 e 28 dias e o tipo de agregado graúdo adotado, considerando apenas as tensões no instante de aplicação da protensão.

$$P_{m0} \leq \frac{A \cdot f_{ct,0} + \alpha_{top} \cdot M_0}{(\alpha_{top} \cdot e + 1)} \quad (12)$$

$$P_{m0} \leq \frac{-A \cdot f_{cc,0} + \alpha_{base} \cdot M_0}{(\alpha_{base} \cdot e + 1)} \quad (13)$$

Em que:

$M_0$  seja o momento fletor gerado apenas pelo peso próprio da estrutura (N.mm);

$f_{ct,0}$  é a resistência do concreto à tração no instante 0, em MPa;

$f_{cc,0}$  a resistência à compressão do concreto no instante 0, em MPa;

$A$  é a área da seção transversal da peça em mm<sup>2</sup>;

$\alpha_{base}$  a razão entre a área multiplicada pela distância a linha neutra da base do elemento cimentício, sobre o momento de inércia da peça;

$\alpha_{top}$  a razão entre a área multiplicada pela distância a linha neutra do topo do elemento cimentício, sobre o momento de inércia da peça;

$P_{m0}$  seja a força de protensão solicitada pelas tensões no estado elástico (N).

A força de pré dimensionamento considerando as tensões atuantes no compósito cimentício ao longo do tempo é encontrada:

$$P_{m0} \geq \frac{A \cdot f_{ct,t} + \alpha_{top} \cdot M_T}{\Omega (\alpha_{top} \cdot e + 1)} \quad (14)$$

$$P_{m0} \geq \frac{-A \cdot f_{ct,t} + \alpha_{base} \cdot M_T}{\Omega (\alpha_{base} \cdot e + 1)} \quad (15)$$

Onde:

$M_T$  seja o momento fletor gerado por todas as cargas ao longo do tempo na estrutura (N.mm);

$f_{ct,t}$  é a resistência do concreto à tração no instante t, em MPa;

$f_{cc,t}$  a resistência à compressão do concreto no instante t, em MPa;

$A$  é a área da seção transversal da peça em mm<sup>2</sup>;

$\alpha_{base}$  a razão entre a área multiplicada pela distância a linha neutra da base do elemento cimentício, sobre o momento de inércia da peça;

$\alpha_{top}$  a razão entre a área multiplicada pela distância a linha neutra do topo do elemento cimentício, sobre o momento de inércia da peça;

$P_{m0}$  seja a força de protensão solicitada pelas tensões no estado elástico;

$\Omega$  é o coeficiente de perda de protensão, sendo adotado 0,85.

A resistência limitante à compressão foi considerada conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), na Equação 16, e a tensão atuante de tração foi considerada nula, para que a protensão completa fosse garantida. O carregamento da viga contou apenas com ações permanentes de peso próprio, com 25 kN/m<sup>3</sup>, não considerando ações acidentais.

$$f_{cc} = 0,85 \cdot f_{cd} \quad (16)$$

Sendo:

$f_{cc}$  a resistência limitante de compressão (MPa);

$f_{cd}$  a resistência de cálculo do concreto (MPa);

A força de protensão aplicada foi definida considerando os valores limites estabelecidos na NBR 6118 (ABNT, 2014), sendo para cada monocordoalha o menor valor entre:

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,80 f_{ptk} \\ 0,87 f_{pyk} \end{cases} \quad (17)$$

Em que:

$\sigma_{pi}$  é a tensão aplicada pelo equipamento tensionante em MPa;

$f_{ptk}$  seja a resistência característica à tração da cordoalha, sendo 1481,88 MPa;

$f_{pyk}$  seja a resistência ao escoamento da cordoalha, sendo 1455,74 MPa.

### 3.3 Variáveis analisadas

A influência da classe de agressividade adotada, que aumenta o  $f_{ck}$  inicial do concreto, e o módulo de elasticidade do concreto foram consideradas em duas idades de aplicação da protensão, tendo como variável quatro tipos de agregado graúdo empregado na mistura do compósito cimentício.

O concreto adotado em cada exemplo de viga seguiu as especificações contidas na Tabela 1, em que serão comparadas as quatro classes de agressividade, variando assim a classe de resistência do concreto, e também a idade de protensão. Portanto, para o concreto contido na classe de agressividade I, foi utilizado concreto C25, para a classe II utilizou-se concreto C30, na classe III concreto C35 e na classe IV adotado concreto C40, utilizando-se duas idades do concreto para a protensão, sendo de 15 e 28 dias.

O abatimento do concreto foi adotado como 12 cm, a cura do concreto foi considerada em temperatura média de 20°, e para umidade média do ambiente foram considerados dados da cidade de Toledo – Paraná, sendo de 73,42% (CLIMATE DATA, 2021).

O módulo de elasticidade inicial do concreto ( $E_{ci}$ ) utilizado para o cálculo das perdas de protensão foi calculado conforme especificações da norma NBR 6118 (ABNT, 2014), para concretos contidos na faixa de  $f_{ck}$  entre 20 MPa a 50 MPa.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (18)$$

Onde:

$E_{ci}$  seja o módulo de elasticidade inicial do concreto (MPa);

$f_{ck}$  seja a resistência característica à compressão (MPa);

$\alpha_E$  é o indicador utilizado em função da origem natural do agregado utilizado no concreto;

$\alpha_E = 1,2$  para basalto e diabásio;

$\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaisse;

$\alpha_E = 0,9$  para calcário;

$\alpha_E = 0,7$  para arenito;

Para o cálculo do  $E_{ci}$  na idade de 15 dias do concreto, utilizou-se a Equação 19 para correção do  $f_{ck}$ , conforme determina a NBR 6118 (ABNT, 2014), adotando-se o cimento CP II nos concretos estudados.

$$f_{ckj} = \beta_1 \cdot f_{ck} \quad (19)$$

Em que:

$$\beta_1 = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{0,5} \right] \right\} \quad (20)$$

Onde:

$s = 0,25$  para concreto de cimento CPI e II.

$t$  seja a idade do concreto em dias, a ser calculado o valor de  $f_{ckj}$ .

$f_{ckj}$  é a força característica à compressão no dia  $j$ .

O  $\varepsilon_{cs}$ , e o  $\varphi$  para cada idade de protensão durante a vida útil da estrutura foram definidos conforme o Anexo A da NBR 6118 (ABNT, 2014), respectivamente nos itens A.2.3 e A.2.2.

### 3.4 Determinação das perdas de protensão

As perdas de protensão serão calculadas para cada combinação realizada entre posicionamento das monocordoalhas engraxadas protendidas nas vigas, pós-tracionadas, agregado graúdo e classe de agressividade e idade empregados no concreto, determinada a vida útil da estrutura em 50 anos.

Após o cálculo das perdas de protensão para cada tipo de viga determinada foi realizado comparativo entre todos os resultados obtidos, buscando verificar qual tipo de combinação resulta em menores perdas da força de protensão.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das perdas de protensão estão todos contidos no Apêndice A, sendo obtidas para os diferentes módulos de elasticidade do concreto em variadas classes de agressividade, sendo comparadas e discutidas, e calculadas em três pontos diferentes em cada estrutura protendida estudada, na extremidade da ancoragem ativa, no meio do vão e na extremidade da ancoragem passiva.

### 4.1 Módulos de elasticidade

Os valores de  $f_{ck}$  utilizado nas análises para as idades de 15 e 28 dias são apresentados na Tabela 2, de acordo com sua classe de agressividade.

**Tabela 2 - Valores de  $f_{ck}$  adotados conforme classe de agressividade.**

Classe de agressividade	Resistência característica à compressão (MPa)	
	t = 15 dias	t = 28 dias
I	22,81	25
II	27,38	30
III	31,94	35
IV	36,50	40

Fonte: A autora (2021).

Utilizando a Equação 18 foram obtidos os valores de  $E_{ci}$  apresentados nas Tabelas 3 e 4, para a idade de 15 e 28 dias, respectivamente, conforme classe de agressividade e agregado adotado.

**Tabela 3 - Módulos de elasticidade aos 15 dias conforme agregado e classe de agressividade.**  
Módulos de elasticidade aos 15 dias (MPa)

Classe de agressividade	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	32094,60	26745,50	24070,95	18721,85
II	35163,01	29302,51	26372,25	20511,75
III	37978,41	31648,67	28483,80	22154,07
IV	40599,03	33832,53	30449,28	23682,77

Fonte: A autora (2021).

**Tabela 4 - Módulos de elasticidade aos 28 dias conforme agregado e classe de agressividade.**  
**Módulos de elasticidade aos 28 dias (MPa)**

Classe de agressividade	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	33600,00	28000,00	25200,00	19600,00
II	36806,96	30672,46	27605,22	21470,72
III	39756,06	33130,05	29817,04	23191,03
IV	42501,01	35417,51	31875,76	24792,26

Fonte: A autora (2021).

Observa-se que o concreto com agregado de origem basáltica apresenta maiores valores de  $E_{ci}$  em relação ao restante por conta de seu coeficiente  $\alpha_E$ , em comparação aos demais, assim como uma variação do  $E_{ci}$  entre as classes de agressividade devido ao aumento do  $f_{ck}$  inicial utilizado.

#### 4.2 Pré-dimensionamento da força de aplicação da protensão

Através da análise das tensões em fase elástica do concreto, obteve-se uma faixa útil de valores de força de aplicação em kN, levando em consideração os limites impostos das tensões de tração e compressão presentes na seção transversal da peça, tanto nos tempos iniciais como ao longo do tempo, considerando também seu carregamento, apenas o peso próprio, sendo então apresentada Tabela 5.

**Tabela 5 - Faixa útil de aplicação da força inicial de protensão aos 15 e 28 dias.**

Classe	Faixa útil (kN) - 28 dias	Faixa útil (kN) - 15 dias
I; II; III; IV.	$314,37 \leq x \leq 636,70$	$314,37 \leq x \leq 636,70$

Fonte: A autora (2021).

De acordo com as Equações 12 e 15, o intervalo, em que  $x$  é a força de aplicação da protensão inicial, ficou definido apenas pelas parcelas que consideravam a limitante à tração do concreto, sendo nula, portanto, não ocorreu variação da faixa útil nas classes, isto sendo pelo fato do limite à tração ser adotado como zero para todas as classes de agressividade adotadas.

Desse modo, foi considerado adotar o valor de 600 kN de aplicação de força inicial, o qual gerava uma tensão inicial na seção transversal da viga de concreto

protendido de 990,09 MPa, e através da Equação 17, gerou-se as limitantes de tensão inicial no compósito cimentício, respectivamente de 1.481,18 MPa e 1.455,74 MPa, demonstrando então que a força inicial de protensão de 600 kN estava dentro da limitação calculada, podendo então ser adotada.

### 4.3 Perdas imediatas

#### 4.3.1 Cálculo da perda por encurtamento do concreto

A perda média por retração por cabo do concreto foi calculada em dois pontos, extremidade de aplicação de carga e meio do vão, dos dois modelos das vigas protendidas, para as idades de 15 e 28 dias, variando o  $f_{ck}$  e módulo de elasticidade conforme classe de agressividade adotada, sendo no apoio e no meio do vão das mesmas, e utilizando a força de protensão de 600 kN, sendo 100 kN em cada cabo.

##### 4.3.1.1 Cálculo da perda por encurtamento do concreto em V1

Para o modelo de viga V1, para as duas idades avaliadas, neste caso com o cabo reto e excentricidade constante do início ao fim do elemento estrutural, as tensões devidas à protensão e excentricidade do cabo, juntamente com as tensões geradas pelo peso próprio atuantes na seção transversal, no posicionamento em que foram realizados os cálculos das perdas por encurtamento elástico do concreto, que se independeram do módulo de elasticidade do concreto, são apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6 - Tensões contribuintes à perda imediata por encurtamento do concreto em V1 (MPa).**

Dia de protensão	Apoio		Meio do vão	
	$\sigma_{cp}$	$\sigma_{cg}$	$\sigma_{cp}$	$\sigma_{cg}$
15 e 28	-8,10	0	-8,10	3,384

Fonte: Autora (2021).

Observa-se que que a  $\sigma_{cg}$  é zero no apoio, pois não há momento devido ao peso próprio, e conseqüentemente no meio do vão ela é considerada, pois já ocorria momento gerado pelo peso próprio da estrutura. Ao examinar a  $\sigma_{cp}$ , que leva em



conta a tensão gerada pelo ato de protensão juntamente com a tensão que ocorre devido a excentricidade do cabo em relação à linha neutra, verifica-se que ela é constante ao longo de V1.

No entanto, a variação que ocorre entre as combinações geradas para cálculo da perda por encurtamento do concreto na V1, é dada através da relação entre os módulos de elasticidade da armadura ativa e do concreto, sendo seus valores empregados representados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Valores de  $\alpha_p$  conforme classe de agressividade e agregado adotado para 15 e 28 dias.**

Classe	$\alpha_p$ (15 dias)				$\alpha_p$ (28 dias)			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	6,08	7,29	8,10	10,42	5,80	6,96	7,74	9,95
II	5,55	6,65	7,39	9,51	5,30	6,36	7,06	9,08
III	5,13	6,16	6,85	8,80	4,90	5,89	6,54	8,41
IV	4,80	5,76	6,40	8,23	4,59	5,51	6,12	7,87

**Fonte: Autora (2021).**

Isto posto, verifica-se que há a diminuição de  $\alpha_p$  conforme o aumento do  $f_{ck}$ , que está intrinsecamente ligado ao dia de protensão, e também ocorre a variação conforme o agregado utilizado estando assim, atrelado ao módulo de elasticidade que se apresentou superior para o agregado basáltico, com decréscimo na ordem do agregado de granito, calcário e arenito.

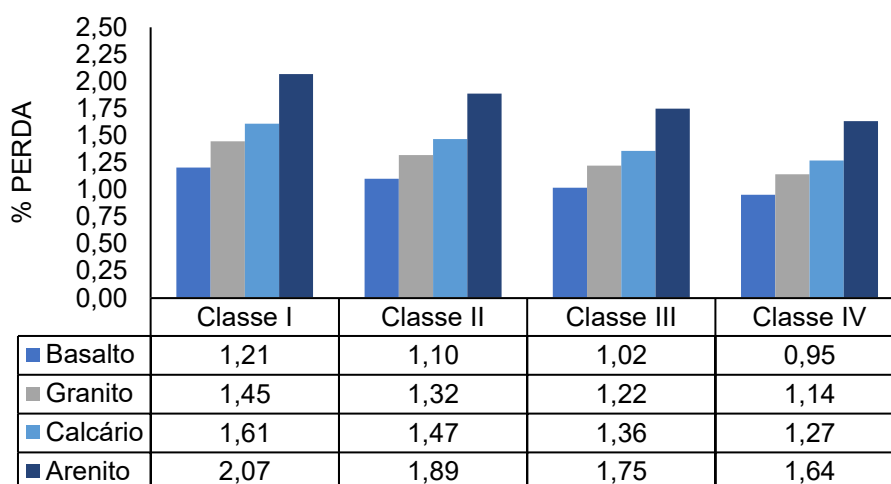
Deste modo precedeu-se ao cálculo das perdas ocasionadas pelo encurtamento elástico do concreto conforme a Equação 2 no apoio e meio do vão da V1, estando contidos os resultados destas perdas no Apêndice A, nas Tabelas A.1 e A.2.

Ao fazer uma comparação direta com a posição em que foi calculada a perda, sendo no apoio e no meio do vão da viga, esta é mais significante quando verificada no apoio para todas as classes de agressividade e agregados adotados, devendo-se ao fato de as tensões no apoio ocorrentes da protensão e da excentricidade não possuírem tensão ocasionada pelo peso próprio para gerar equilíbrio na seção transversal calculada, havendo um nível elevado de esforço atuante quando este comparado à seção transversal presente no meio do vão, sucedendo maior perda por encurtamento elástico do concreto no apoio da viga.

Porém, todas as análises seguintes em V1 foram efetuadas na seção central da estrutura, pois a diferença entre esses dois pontos é mínima, afim de realizar comparativos com a V2 nesta mesma posição.

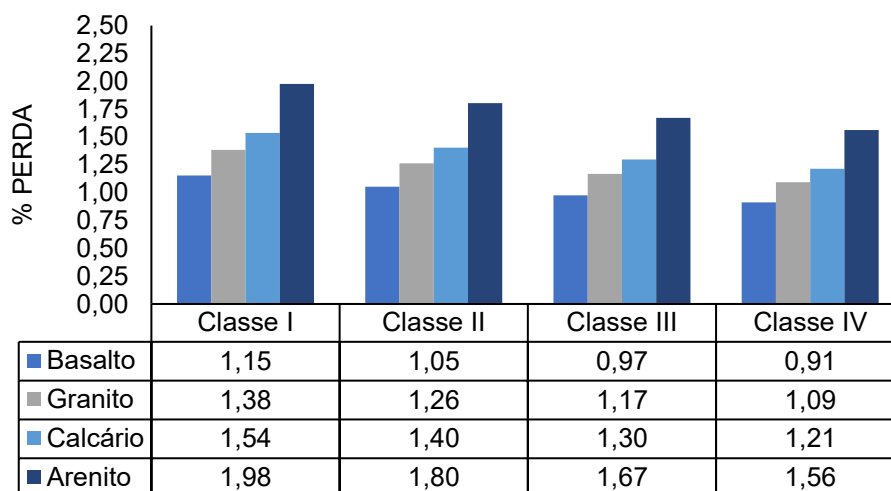
Nos Gráficos 1 e 2 foram demonstradas as perdas médias de tensão em percentual por encurtamento para todos os cabos no meio do vão, conforme classe de agressividade e agregado graúdo adotados no compósito cimentício, para os 15 e 28 dias, por essa ordem.

**Gráfico 1 – Perda média percentual por encurtamento no concreto no meio do vão da V1 aos 15 dias.**



Fonte: Autora (2021).

**Gráfico 2 – Perda média percentual por encurtamento no concreto no meio do vão da V1 aos 28 dias.**



Fonte: Autora (2021).

Sendo assim, é possível constatar que a classe de agressividade I, que possui menor  $f_{ck}$  inicial, foi a que gerou maior perda de tensão média por cabo, pois contava

com menor módulo de elasticidade em comparação as outras classes, havendo redução decrescente da perda de acordo com o aumento da classe de agressividade, em que a classe IV foi a que menos apresentou perda por encurtamento.

Analisando os agregados graúdos utilizados, o basalto foi o que gerou perdas menores em comparação aos demais, sendo o agregado arenito o que mais gerou perdas, estando estas intrinsecamente ligadas ao valor de seu respectivo módulo de elasticidade. Dessa forma, constata-se que se torna mais viável o uso de um  $f_{ck}$  menor, quando o ambiente permitir, e o uso de um agregado que eleve o módulo de elasticidade, como o basalto em uma classe I em comparação direta ao arenito e calcário em qualquer uma das 4 classes adotadas.

Realizando comparativo entre as perdas geradas nas duas idades do compósito, verifica-se que não houve grande discrepância entre as perdas por retração no elemento estrutural devido a idade de aplicação da protensão, havendo redução de aproximadamente 5% de perdas quando a estrutura é protendida aos 28 dias ao invés de 15 dias de cura do concreto.

#### 4.3.1.2 Cálculo da perda por encurtamento do concreto em V2

As tensões contribuintes à perda por encurtamento do concreto no modelo estrutural V2 são apresentadas na Tabela 8, determinadas conforme item 2.5.2 da revisão bibliográfica.

**Tabela 8 - Tensões contribuintes à perda imediata por encurtamento do concreto em V2 (MPa).**

Dia de protensão	Apoio		Meio do vão	
	$\sigma_{cp}$	$\sigma_{cg}$	$\sigma_{cp}$	$\sigma_{cg}$
15 e 28	-2,71	0	-8,10	3,38

Fonte: Autora (2021).

Portanto para V2,  $\sigma_{cp}$  não se mantém constante ao longo da estrutura, pois a trajetória do cabo é parabólica, não havendo excentricidade em seus apoios em relação à linha neutra. Como  $\sigma_{cg}$  é dependente do peso próprio da estrutura, é nula também nesta posição, ocorrendo apenas na seção presente no meio do vão.

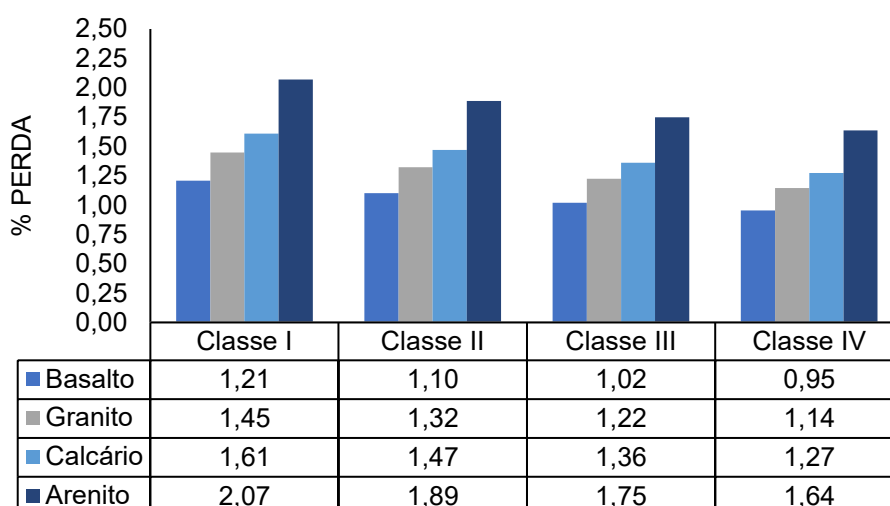
Assim sendo, a única variação ocorrente entre as combinações geradas para cálculo da perda por encurtamento do concreto em V2, é ocasionada através do  $\alpha_p$ , em que os valores empregados deste são os mesmos para V1, contidos na Tabela 7.

Dessa maneira realizou-se o cálculo das perdas por encurtamento do concreto conforme a Equação 2, sendo nos apoios e meio do vão da V2, estando contidas no Apêndice A nas Tabelas A.3 e A.4.

Destarte, verifica-se que a perda por encurtamento é de maior magnitude no meio do vão em relação à sua extremidade, devido a ocorrência de maiores tensões atuantes na seção central da peça, gerando assim por consequência maiores perdas por cabo. A análise de todas as perdas precederá através do meio do vão da V2, para posterior comparação à V1.

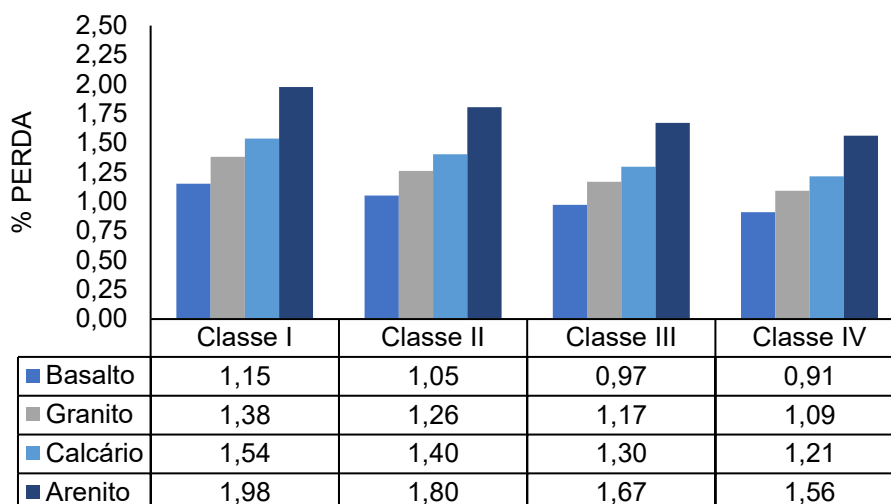
Os Gráficos 3 e 4 demonstram as perdas percentuais para todos os cabos devido ao encurtamento do concreto aos 15 e 28 dias no meio do vão das vigas, respectivamente.

**Gráfico 3 - Perda média percentual por encurtamento no concreto no meio do vão da V2 aos 15 dias.**



Fonte: Autora (2021).

**Gráfico 4 - Perda média percentual por encurtamento no concreto no meio do vão da V2 aos 28 dias.**



**Fonte: Autora (2021).**

Verifica-se que o comportamento desta se dá de maneira semelhante a V1, visto que as tensões atuantes no meio das vigas são idênticas.

Dessa forma, nota-se que o basalto foi o agregado graúdo que gerou menores perdas e o arenito o que mais gerou diminuição de protensão, também se observa que há maior viabilidade em utilizar-se um agregado que gere maior módulo de elasticidade a elevar-se a classe de agressividade do concreto utilizado para minimização das perdas e também maiores economias financeiras. Como em V1, a protensão realizada aos 15 e 28 dias não causou grandes disparidades na perda de protensão por encurtamento do concreto.

#### 4.3.1.3 Comparativo da perda por encurtamento do concreto entre V1 e V2

Para o cálculo das perdas imediatas por retração do concreto entre os dois modelos de trajetória de cabo adotados, a única dessemelhança foram as tensões atuantes nas extremidades de cada elemento estrutural, em que fazendo comparativo entre a Tabela 6 e Tabela 8, apenas o valor de  $\sigma_{cp}$  no apoio é modificado devido a existência de excentricidade no apoio de V1.

Posto isto, como em V2 não há a tensão por conta da excentricidade em relação à linha neutra da seção transversal no apoio,  $\sigma_{cp}$  assume um valor de menor magnitude do que o presente em V1, o qual eleva a tensão atuante em V1 em comparação à V2, fazendo com que as perdas por

encurtamento no apoio de V1 sejam maiores do que em V2, ocorrendo isso para as duas idades consideradas, e em comparação a qualquer um dos quatro agregados e classes de agressividade adotados.

A perda de força em percentual em cada uma das posições calculadas devido ao encurtamento elástico do concreto está contida na Tabela A.5 e A.6, para o meio do vão e no apoio, estando ambas no Apêndice A.

Realizando comparativo entre as perdas por encurtamento geradas devida a trajetória do cabo, através dos Gráficos 1, 2, 3 e 4, constata-se que a perda ocorrida no meio do vão por encurtamento do concreto são iguais em ambas as trajetórias de vigas estudadas, pois as tensões atuantes na seção transversal central da estrutura são as mesmas.

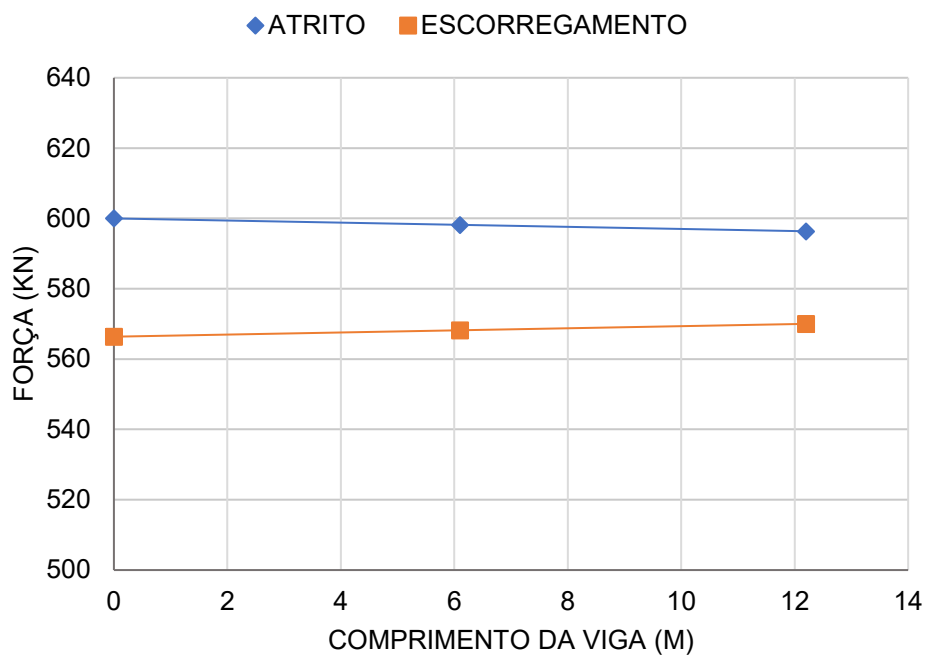
Considerando um parâmetro geral das perdas por encurtamento do concreto, analisa-se que ao protender o concreto com uma idade de cura mais elevada, as perdas diminuem, e ao utilizar-se de uma classe de agressividade maior o mesmo comportamento é notado, e também, conforme o tipo de agregado utilizado, o módulo de elasticidade aumenta e as perdas decrescem. Porém os valores de discrepância conforme a idade de protensão e mesma trajetória do cabo não sofrem grandes variações, não chegando nem a 1% de diferença de redução da força de protensão da armadura ativa.

#### 4.3.2 Cálculo da perda por atrito e por retrocesso da ancoragem

Como a perda por atrito e a perda por retrocesso da ancoragem não são dependentes do módulo de elasticidade do material, do agregado graúdo e da idade de aplicação da protensão assumidos, elas possuem mesma magnitude para as combinações geradas, diferindo-se apenas conforme a trajetória da armadura ativa.

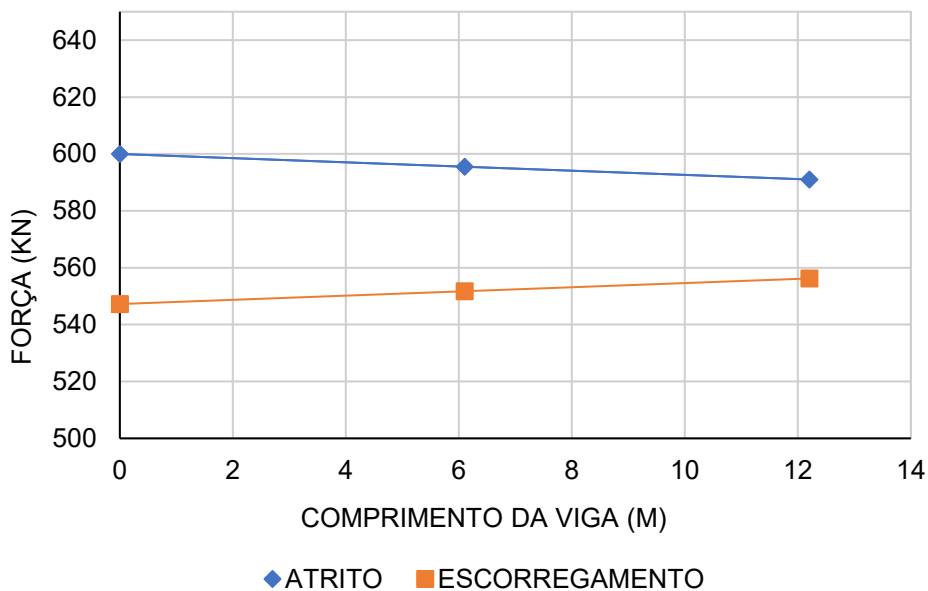
Nos Gráficos 5 e 6 são representadas as forças de protensão após a perda por atrito e por retrocesso da armadura para as vigas V1 e V2, respectivamente. Ressalta-se que após o travamento da ancoragem a força de protensão no cabo passa a ter a magnitude apresentada como “escorregamento”.

**Gráfico 5 - Perda da força de protensão por atrito e retrocesso na ancoragem em V1 (cabo reto).**



Fonte: Autora (2021).

**Gráfico 6 – Perda da força de protensão por atrito e retrocesso na ancoragem em V2 (cabo parabólico).**



Fonte: Autora (2021).

Observa-se que devido à pequena perda por atrito e grande retrocesso da ancoragem as retas que representam as forças de protensão após a perda por atrito

e escorregamento não se interceptam, indicando que o retrocesso da ancoragem no momento do travamento resulta em perda de protensão ao longo de todo o cabo.

As perdas totais por atrito e retrocesso da ancoragem presentes no início, meio do cabo de protensão e em seu final, estão contidas no Apêndice A na Tabela A.7.

A Tabela 9 representa o percentual de redução da força de protensão, após as perdas por atrito e retrocesso das ancoragens, considerando a força inicial de protensão de 600 kN.

**Tabela 9 - Perda percentual por atrito e retrocesso da ancoragem em V1 e V2 (%).**

V1			V2		
Início do vão	Meio do vão	Fim do vão	Início do vão	Meio do vão	Fim do vão
5,61	5,30	5,00	8,79	8,05	7,30

Fonte: Autora (2021).

Em V1, onde o cabo possui trajetória reta, as perdas devidas ao atrito e ao retrocesso demonstraram menores magnitudes e discrepâncias entre si, relacionadas as ocorridas na viga V2, que por conta de sua trajetória parabólica, possuindo assim pontos de desvio de cabo que causam dissipação do tensionamento da armadura ativa, e também propiciam maior retrocesso da ancoragem, fez com que suas perdas fossem mais significativas nos três pontos calculados da viga.

#### **4.4 Determinação da força total de protensão e comparativos após perdas imediatas**

As perdas totais imediatas no início, meio e final do vão das vigas e apresentadas no Apêndice A nas Tabelas A.8, A.9 e A.10.

A força total de protensão após as perdas imediatas (P0) variam ao longo de toda a armadura protendida, sendo estas presentes no Apêndice A nas Tabelas A.11, A.12 e A.13, para o início, meio e fim do vão, por essa ordem. As porcentagens de redução da força inicial após as perdas imediatas no início, meio e fim do vão das combinações de V1 e V2 estão apresentadas também no apêndice A nas tabelas A.14, A.15 e A.16.

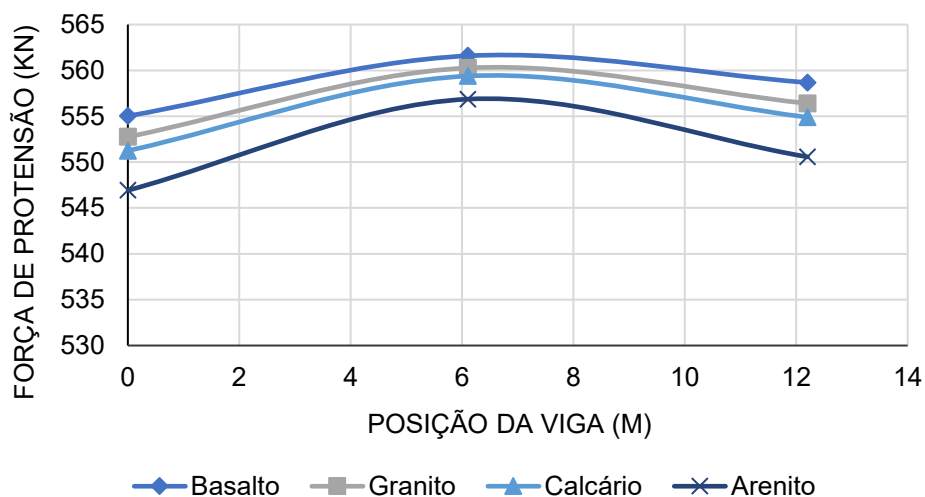
Após a determinação das forças de protensão após as perdas imediatas nos elementos estruturais estudados, observa-se que o comportamento das vigas segue



um padrão conforme a classe de agressividade utilizada, agregado graúdo, e idade de protensão do compósito cimentício.

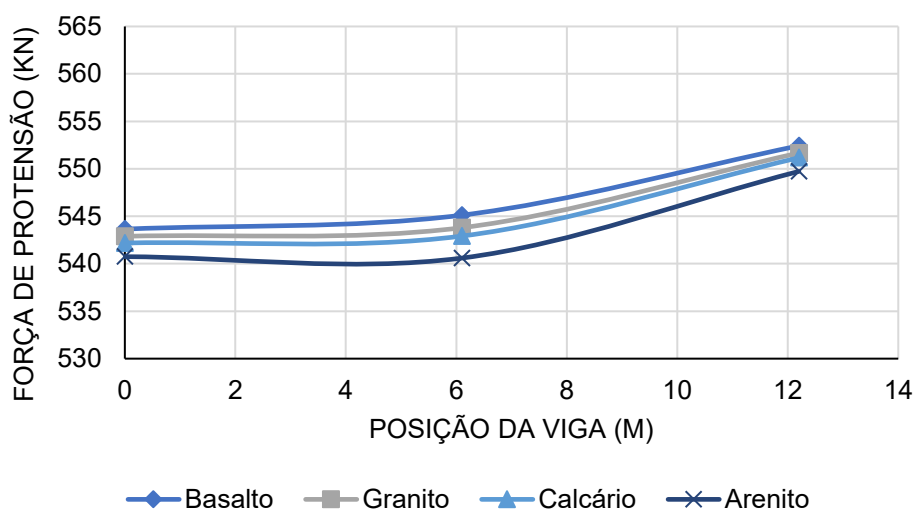
Para analisar a trajetória do cabo e sua influência nas perdas de protensão, os Gráficos 7 e 8 foram plotados, para a V1 e V2, respectivamente, em que a combinação das vigas que apresentaram sua força ao longo de seu comprimento, utilizaram-se dos quatro tipos de agregados estudados, e fixando-se seu dia de protensão em 15 dias de idade do concreto, e classe de agressividade II, pois geralmente esta é a classe utilizada em elementos protendidos.

**Gráfico 7 – Força de protensão ao longo do comprimento cabo após perdas imediatas na classe II, em V1 aos 15 dias.**



Fonte: Autora (2021).

**Gráfico 8 - Força de protensão ao longo do comprimento cabo após perdas imediatas na classe II, em V2 aos 15 dias.**



Fonte: Autora (2021).

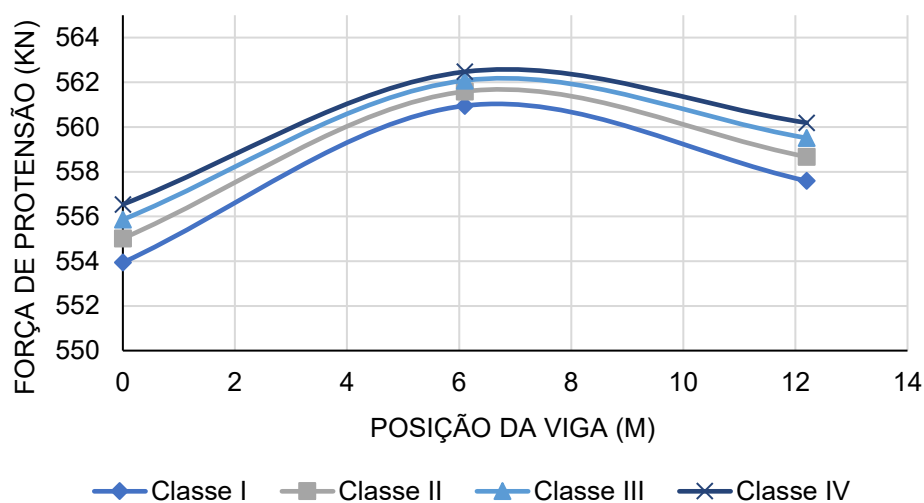
Assim sendo, constata-se que a V1 gerou menores perdas nas três posições do elemento estrutural, para vigas biapoiadas e solicitações apresentadas, consideradas quando comparado o mesmo agregado graúdo em ambas, em que V2 apresentou perdas com magnitude de até 30% superiores no meio do vão em relação à V1 em mesma classe de agressividade, agregado graúdo e dia de protensão. Comparando-se o basalto nos dois trajetos de cabos, o agregado apresentou melhor desempenho em V1, principalmente no início e meio do vão.

Analisando-se V2, constata-se que ocorreram maiores perdas de protensão imediatas no início do vão, e que a menor quantia de perdas foi gerada no fim do mesmo. Já em V1 aconteceram menores diferenças nas perdas imediatas nos dois apoios da estrutura, sendo menos discrepantes quando comparados aos da V2.

Examinando o comportamento dos agregados graúdos utilizados, nota-se declínio das perdas conforme o aumento do seu coeficiente  $\alpha_E$ , pois conforme maior esse coeficiente, mais elevado é seu módulo de elasticidade, ocasionando assim menores perdas, em que o basalto foi o agregado que gerou menores perdas de protensão imediatas, enquanto o arenito foi o que gerou valores mais elevados destas.

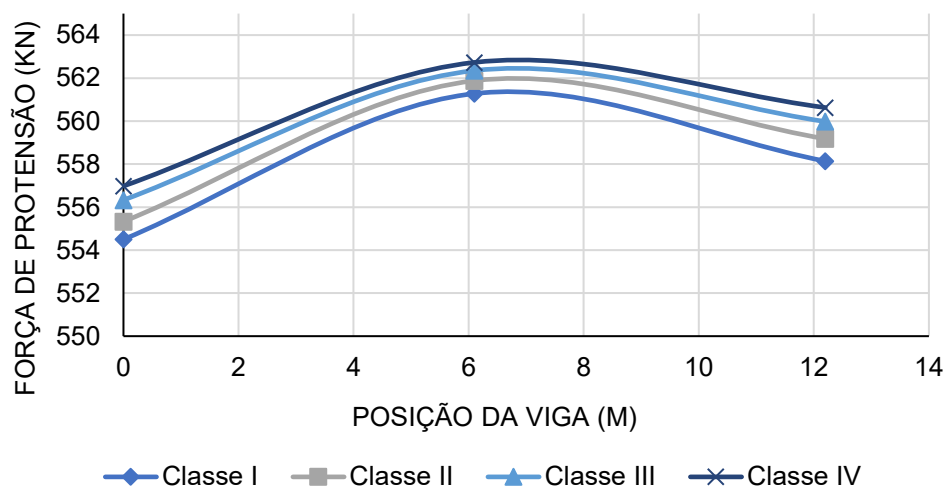
Fixando o agregado graúdo basalto, e variando-se as classes de agressividade, para análise de desempenho das mesmas, através de mesma trajetória do cabo em diferentes dias de protensão, gerou-se os Gráficos 9 e 10.

**Gráfico 9 - Força de protensão ao longo do comprimento cabo após perdas imediatas com o agregado basáltico, em V1 aos 15 dias de protensão.**



Fonte: Autora (2021).

**Gráfico 10 - Força de protensão ao longo do comprimento cabo após perdas imediatas com o agregado basáltico, em V1 aos 28 dias de protensão.**

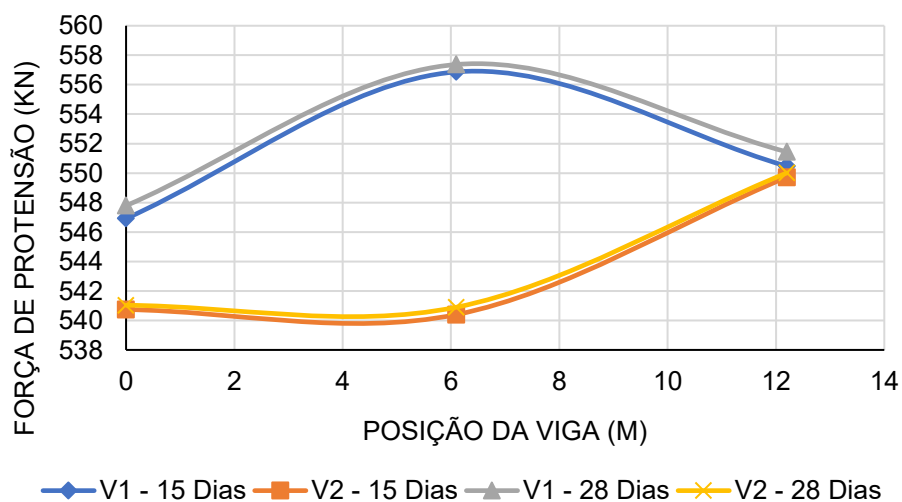


Fonte: Autora (2021).

Averigua-se que por meio da classe da agressividade, as perdas assumem comportamento decrescente conforme o seu aumento, pois ocorre o aumento do seu  $f_{ck}$ . Porém ao comparar as perdas geradas na idade mais precoce em relação a mais avançada, não são notáveis as diferenças que ocorrem, trazendo pouco acréscimo nas perdas imediatas quando a estrutura é protendida aos 15 dias.

No Gráfico 11 fixou-se a combinação do agregado arenítico e da classe de agressividade ambiental II, variando-se apenas o dia de protensão e trajetória do cabo.

**Gráfico 11 - Força de protensão ao longo do comprimento cabo após perdas imediatas com o agregado arenito, em V1 e V2 aos 15 e 28 dias de protensão.**



Fonte: Autora (2021).

Desta forma, verifica-se que o arenito teve melhor desempenho na V1 aos 28 dias de protensão, obtendo valores semelhantes se protendida a viga aos 15 dias, em relação as perdas imediatas de protensão, em que as perdas geradas em V2 foram maiores do que as geradas em V1, para a mesma classe de agressividade. Portanto seria mais viável ao utilizar o agregado arenito, fazer uso de uma trajetória de cabo reta, com excentricidade em relação à linha neutra, e protensão aos 15 ou 28 dias. O restante dos agregados apresenta conduta análogas ao do arenito, ao comparar-se as classes, trajetórias e dia de protensão.

#### 4.5 Perdas Progressivas

As perdas progressivas foram determinadas a partir das forças de protensão após as perdas imediatas, sendo calculadas a partir do item 2.6 e determinadas para o início, meio e fim do vão de V1 e V2, aos 15 e 28 dias de idade de protensão.

##### 4.5.1 Determinação das perdas progressivas

##### 4.5.1.1 Perdas advindas da retração e fluência do concreto

Os coeficientes de fluência e retração do concreto utilizados para obtenção dos resultados, tanto para V1 e V2, aos 15 e 28 dias de protensão e para uma vida útil de 50 anos da estrutura, dependem apenas da umidade do ambiente, idade de protensão, espessura do elemento estrutural e trabalhabilidade do compósito cimentício, não vinculando-se a classe de agressividade adotada, sendo apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Coeficientes de fluência e retração do concreto em V1 e V2.**

$\varphi(t, t_0)$ – Coeficiente de fluência		$\varepsilon_{cs}$ - Deformação específica de retração	
15 dias	28 dias	15 dias	28 dias
2,975145	2,67093693	-0,000446	-0,000427

Fonte: Autora (2021).

Em compatibilidade com os resultados apresentados, nota-se que ao aumentar as idades de protensão ambos os coeficientes se minoram, contribuindo assim para

menor geração de fluência e retração do concreto quando a protensão ocorre em uma idade mais avançada.

Como as tensões atuantes para contribuição às perdas progressivas das vigas eram únicas para cada combinação e posição estudada, tornou-se inviável apresentar suas magnitudes, portanto apenas o resultado final de cada parcela, uma que é dependente da fluência e retração do concreto, e outra que é da relaxação do aço, foram apresentadas.

A parcela das perdas progressivas dependentes da fluência e retração do concreto, conforme Equação 10, no início, meio e fim do vão, apresentaram os resultados apresentados no Apêndice B, nas Tabelas B.1, B.2 e B.3. Portanto, para fim de análise e por possuir comportamento semelhante, apenas as perdas presentes na seção transversal central do vão das estruturas protendidas será discutido.

As perdas percentuais no meio do vão são apresentadas na Tabela 11.

**Tabela 11 - Perdas progressivas percentuais devidas à retração e fluência do concreto em V1 e V2 no meio do vão (%).**

<b>Modelo de viga V1</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	12,45	14,10	15,18	18,19	11,78	13,29	14,28	17,04
<b>II</b>	11,73	13,24	14,24	17,02	11,11	12,50	13,42	15,97
<b>III</b>	11,16	12,57	13,50	16,10	10,59	11,89	12,74	15,13
<b>IV</b>	10,70	12,03	12,90	15,35	10,17	11,39	12,19	14,44

<b>Modelo de viga v2</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	12,49	14,12	15,21	18,17	11,82	13,32	14,30	17,04
<b>II</b>	11,77	13,27	14,27	17,01	11,16	12,54	13,44	15,97
<b>III</b>	11,20	12,60	13,54	16,10	10,65	11,93	12,77	15,14
<b>IV</b>	10,75	12,06	12,93	15,36	10,23	11,44	12,23	14,46

**Fonte: Autora (2021).**

Partindo-se de análise das perdas devidas à retração e fluência do concreto, analisa-se que ao comparar os agregados através das classes de agressividade ocorre declínio das perdas advindas da retração do concreto e da fluência conforme o aumento destas. Logo, comparando-se conforme a trajetória do cabo, V1 e V2, cada qual para a mesma idade de protensão, sendo aos 15 e 28 dias, as perdas ocorridas tornam-se semelhantes em comparações na mesma idade, classe de agressividade e agregado graúdo utilizado.

Através de comparativo entre a mesma trajetória do cabo, agregado graúdo e classe de agressividade, porém dias diferentes de protensão, percebe-se que a idade mais precoce de estiramento gera perdas de maior magnitude devido ao seu  $E_{ci}$  ser menor, em que estas diferenças chegam aproximadamente à 1%, apenas.

#### 4.5.1.2 Perdas advindas da relaxação do aço de protensão

Para cálculo das perdas advindas da relaxação relativa do aço, seu coeficiente é dependente da tensão de tração atuante no cabo protendido e da  $f_{ptk}$ . Neste estudo considerando a força de tração adotada, a razão entre os dois elementos, foi inferior a 0,6, utilizando-se assim o valor de 1,3% para aços RB.

Sendo assim, a partir da Equação 11 encontrou-se as perdas progressivas devida à relaxação relativa do aço. O resultado destas perdas para os três posicionamentos da viga protendida estudada, está contido no Apêndice B, nas Tabelas B.4, B.5 e B.6.

Para as discussões foram analisados os valores encontrados no meio do vão das estruturas, pois nos apoios segue-se o mesmo comportamento. Com isso, a Tabela 12 apresenta as perdas percentuais encontradas no meio do vão, tanto de V1 como de V2.

**Tabela 12 - Perdas progressivas percentuais devidas à relaxação relativa do aço em V1 e V2 no meio do vão (%).**

Modelo de viga v1								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	2,51	2,42	2,36	2,19	2,55	2,47	2,41	2,26
II	2,55	2,47	2,41	2,26	2,59	2,51	2,46	2,32
III	2,58	2,50	2,45	2,31	2,62	2,55	2,50	2,37
IV	2,61	2,54	2,49	2,35	2,64	2,57	2,53	2,40
Modelo de viga v2								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	2,51	2,42	2,36	2,20	2,55	2,47	2,41	2,26
II	2,55	2,47	2,42	2,26	2,59	2,51	2,46	2,32
III	2,58	2,51	2,46	2,31	2,62	2,55	2,50	2,37
IV	2,61	2,54	2,49	2,35	2,64	2,57	2,53	2,41

Fonte: Autora (2021).

Através dos resultados obtidos para as perdas por relaxação relativa é possível observar que ocorre o aumento das perdas com o aumento da classe de agressividade, isto devida à tensão de tração no cabo que se torna menor com um maior  $f_{ck}$ , para que haja o combate das mesmas tensões atuantes em um  $f_{ck}$  menor, que possui menor resistência de compressibilidade do concreto e acaba tendo suas armaduras ativas mais tensionadas, para que haja o combate dos esforços atuantes.

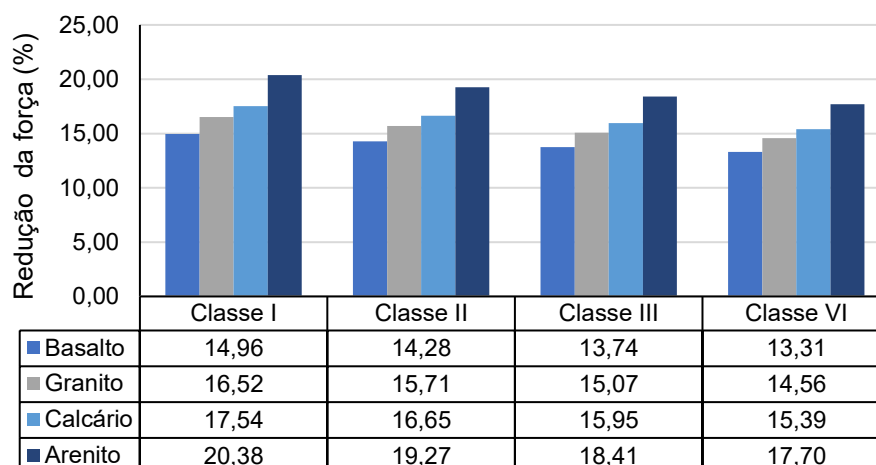
Comparando-se as idades de protensão com diferentes trajetórias do cabo, partindo-se de mesma classe de agressividade e agregado graúdo adotado, observa-se que as perdas são muito semelhantes, e quando ocorrem variações estas estão presentes apenas nas casas decimais.

Por conseguinte, conforme as diferentes idades de protensão, com mesma trajetória de cabo, classe de agressividade ambiental e agregado graúdo utilizado, as idades mais precoces de estiramento apresentaram maiores perdas por encurtamento do concreto nas perdas imediatas do que as geradas na segunda data de protensão, porém também ocorreu variação apenas nas casas decimais, sendo então pouca diferença em relação à idade de protensão das armaduras ativas.

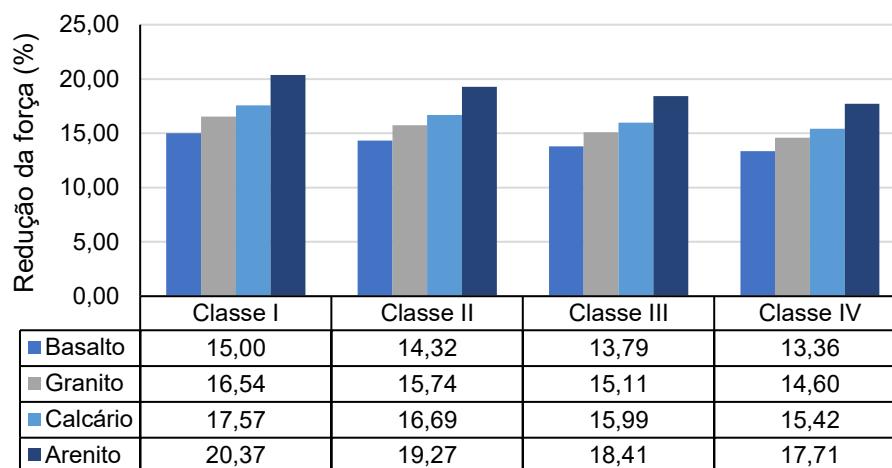
#### 4.5.1.3 Perdas progressivas totais

Após o cálculo da perda por retração e fluência do concreto somadas à perda por relaxação do aço, obtêm-se as perdas progressivas totais em cada uma das combinações realizadas para a composição do elemento estrutural, sendo apresentadas conforme trajetória do cabo, idade de protensão, classe de agressividade, agregado graúdo adotado e posição da seção transversal na estrutura protendida, estando contidas no Apêndice B, nas Tabelas B.7, B.8 e B.9.

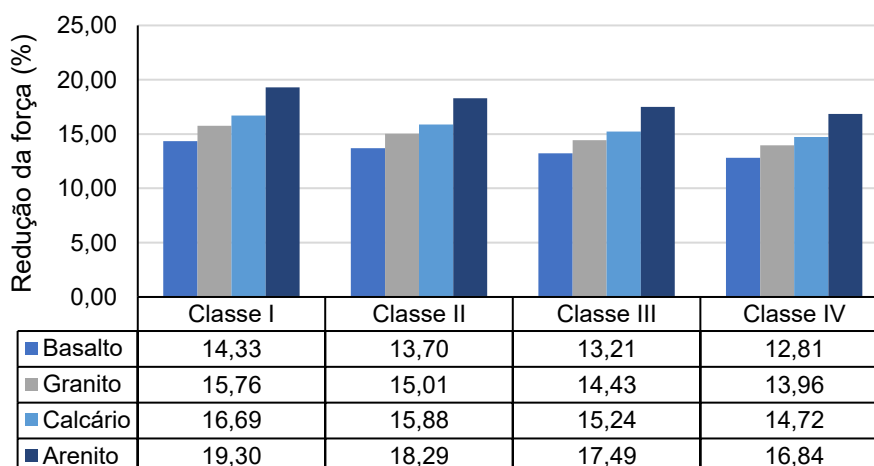
Portanto para as análises e discussões das perdas progressivas totais foram utilizados os valores encontrados no meio do vão da estrutura, em que os Gráficos 12, 13, 14 e 15 demonstram as perdas em porcentagem em relação à força de protensão após as perdas imediatas para cada combinação de classe de agressividade, agregado graúdo e trajetória do cabo e idade de protensão utilizadas nas vigas protendidas.

**Gráfico 12 – Perdas progressivas para V1 aos 15 dias de protensão no meio do vão (%).**

Fonte: Autora (2021).

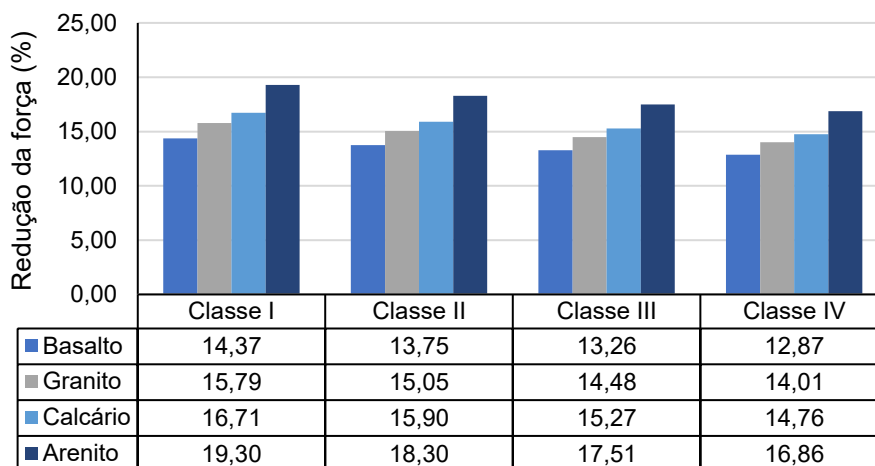
**Gráfico 13 – Perdas progressivas para V2 aos 15 dias de protensão no meio do vão (%).**

Fonte: Autora (2021).

**Gráfico 14 – Perdas progressivas para V2 aos 28 dias de protensão no meio do vão (%).**

Fonte: Autora (2021).



**Gráfico 15 – Perdas progressivas para V2 aos 28 dias de protensão no meio do vão (%).**

**Fonte: Autora (2021).**

Conforme as porcentagens apresentadas, constata-se que as perdas progressivas geraram diminuição de cerca de até 20% em comparação à  $P_0$ , nas combinações de vigas utilizadas.

Dessa forma observa-se que as perdas progressivas de protensão acarretaram maiores valores quando protendidas aos 15 dias de vida do concreto, porém não demonstraram grande diferença conforme a idade de protensão. Também se verifica que o traçado do cabo não influenciou notavelmente no resultado final das perdas progressivas de protensão, gerando valores semelhantes para V1 e V2 nas mesmas idades de cura do concreto para protensão, havendo diferença apenas nas casas decimais.

#### 4.5.2 Determinação e análise da força de protensão no final da vida útil da estrutura

O resultado da soma das perdas, imediatas e progressivas, está contido no Apêndice C nas tabelas C.1, C.2 e C.3.

A força atuante de protensão final da vida útil da estrutura, após 50 anos, é obtida através da força inicial de protensão ( $P_i$ ) subtraída das perdas imediatas e das perdas progressivas, e seus respectivos valores para as três posições estudadas e as combinações de vigas geradas estão contidas no Apêndice C, nas Tabelas C.4, C.5 e C.6.

Para discussão da redução da força de protensão após os 50 anos de vida útil da estrutura, será considerada apenas a redução percentual expressa no meio do vão do compósito cimentício protendido, por apresentar comportamento similar aos outros pontos determinados, na Tabela 13.

**Tabela 13 - Redução da força de protensão após 50 anos no meio do vão de V1 e V2 (%).**

Modelo de viga v1								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	20,50	22,15	23,23	26,25	19,86	21,39	22,39	25,18
II	19,77	21,29	22,29	25,08	19,19	20,59	21,52	24,09
III	19,20	20,62	21,55	24,16	18,66	19,97	20,83	23,24
IV	18,73	20,07	20,95	23,41	18,23	19,47	20,28	22,55

Modelo de viga v2								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	22,86	24,46	25,53	28,42	22,25	23,73	24,69	27,39
II	22,16	23,63	24,61	27,29	21,60	22,96	23,85	26,33
III	21,60	22,98	23,89	26,40	21,09	22,36	23,19	25,52
IV	21,15	23,23	23,30	25,68	20,67	21,87	22,65	24,85

Fonte: Autora (2021).

Desta forma, constata-se que ocorre a diminuição das perdas de protensão conforme o aumento do  $f_{ck}$  inicial utilizado, em V1 e V2, nas duas idades de cura do concreto, e por conseguinte há a diminuição das perdas conforme o aumento do módulo de elasticidade gerado pelos agregados graúdos utilizados. Dessa maneira, verifica-se que V2 gerou maiores perdas de protensão comparadas à V1 nas duas idades de protensão.

Assim sendo, é notável que ao aumentar-se a classe de agressividade e o dia de realização da protensão, a redução da força atuante de protensão é minorada, tanto para V1, como para V2, e em qualquer um dos quatro agregados graúdos utilizados, demonstrando a diferença do uso dos diferentes  $f_{cks}$  adotados. Também se observa que ao realizar a protensão em uma idade mais avançada, ocorre a diminuição das perdas de protensão.

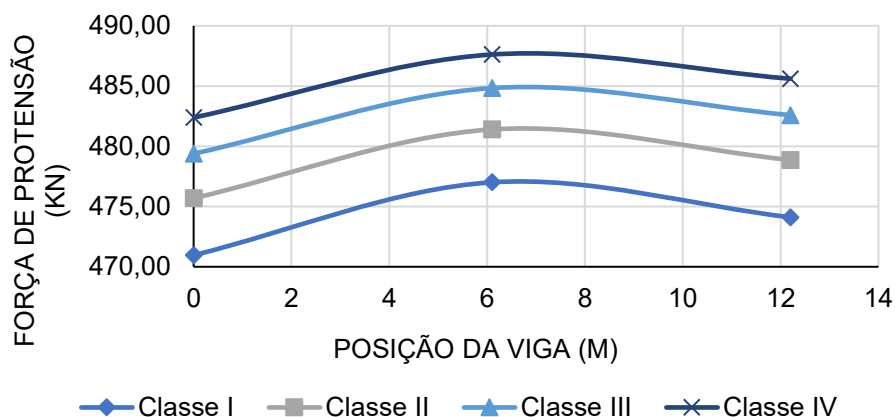
Conforme Paez (2018), para a redução da perda de protensão, seria necessário adicionar armadura passiva complementar, pois por mais que a estrutura protendida não necessite se torna conveniente a utilização de aço passivo na parte inferior da viga, devido que à medida que o aço inferior aumenta, a perda diminui,

havendo assim redução significativa nas deflexões ao longo da vida útil do elemento estrutural.

#### 4.5.2.1 Comparativo entre as combinações de vigas estudadas após todas as perdas

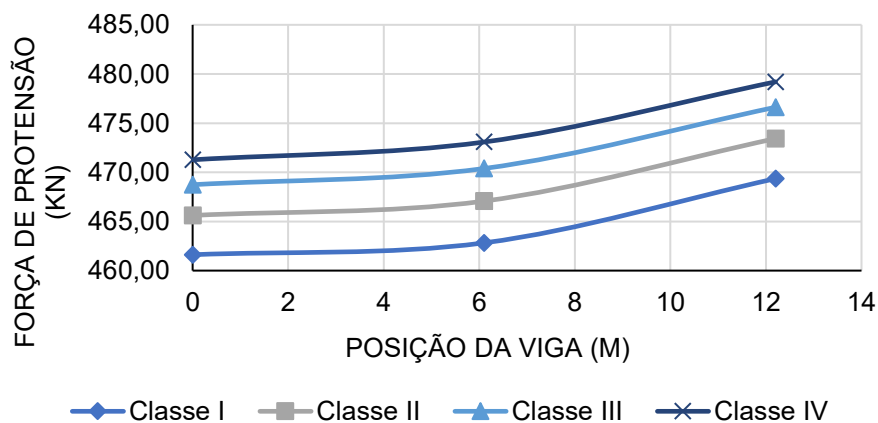
Para análise das classes de agressividade adotadas, e devido ao comportamento semelhante entre todos os agregados graúdos adotados, fixou-se o basalto e variou-se suas classes em uma idade de protensão e duas trajetória de cabo, demonstrando a variação da força ao longo do cabo de protensão, sendo utilizados os Gráficos 16 e 17.

**Gráfico 16 – Força de protensão após perdas totais em V1 aos 15 dias nas quatro classes de agressividade com o basalto.**



Fonte: Autora (2021).

**Gráfico 17 - Força de protensão após perdas totais em V2 aos 15 dias nas quatro classes de agressividade com o basalto.**

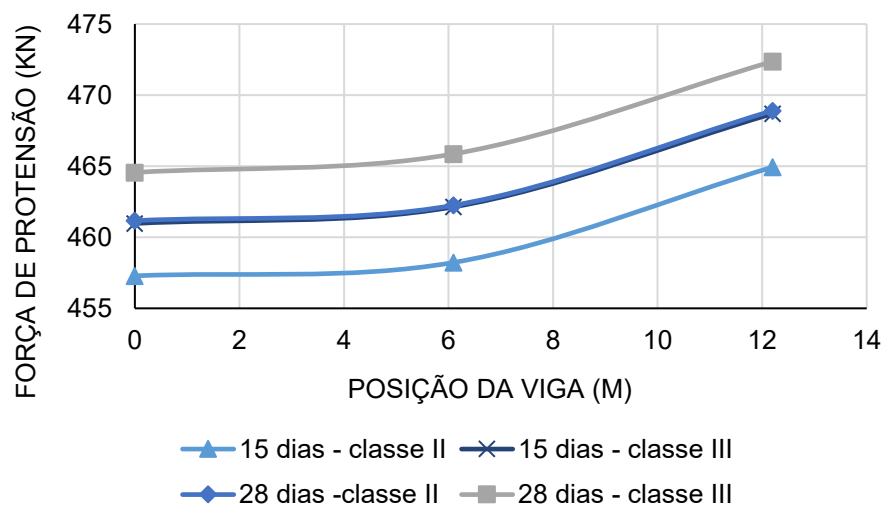


Fonte: Autora (2021).

A ocorrência de comportamento decrescente das perdas progressivas conforme o aumento da classe de agressividade pode ser verificado, tanto para V1 como para V2, em que em V1 e V2 houveram maiores perdas no início de seu vão, porém em V1 a menor perda de protensão ocorreu em sua seção transversal central, e em V2 foi no fim de seu vão, gerando comportamento semelhante para todas as classes de agressividade adotadas. Portanto, para mesma idade de protensão, V1 apresentou menores perdas de protensão em comparação à V2.

Para comparação entre diferentes idades de protensão, foi gerado o Gráfico 18, fixando-se a classe II e III, trajetória curva e o agregado granito.

**Gráfico 18 – Força de protensão após perdas totais em V2 aos 15 e 28 dias de protensão.**



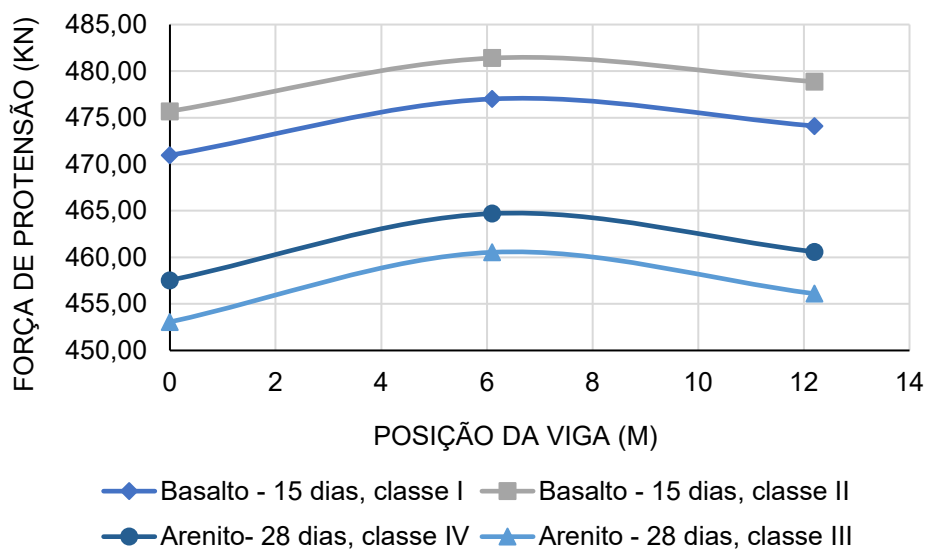
**Fonte: Autora (2021).**

Assim sendo, é notável que ao realizar a protensão em uma idade mais avançada, ocorre a diminuição das perdas de protensão, também se verifica que para o agregado graúdo contido que utiliza o  $f_{ck}$  adotado para a classe II e protendido aos 28 dias, gera-se praticamente a mesma resultante de força final após as perdas totais encontradas aos 15 dias de protensão com o  $f_{ck}$  utilizado na classe III. Então, para que ocorra a mesma perda que é apresentada aos 28 dias de idade de protensão, aos 15 dias, deve-se elevar o  $f_{ck}$  na idade mais antecipada. E se caso haja a possibilidade de postergar a protensão para a idade mais tardia, para que ocorram as mesmas perdas presentes aos 15 dias, pode-se diminuir o  $f_{ck}$  utilizado.

O Gráfico 19 relata a força de protensão final que ocorre em V1 ao longo do comprimento da cordoalha, em que o basalto tem suas classes variadas entre a I e a

II, aos 15 dias de protensão, e o arenito varia suas classes de agressividade entre a III e a IV, aos 28 dias de protensão.

**Gráfico 19 – Força de protensão após perdas totais em V1 aos 15 e 28 dias de protensão.**

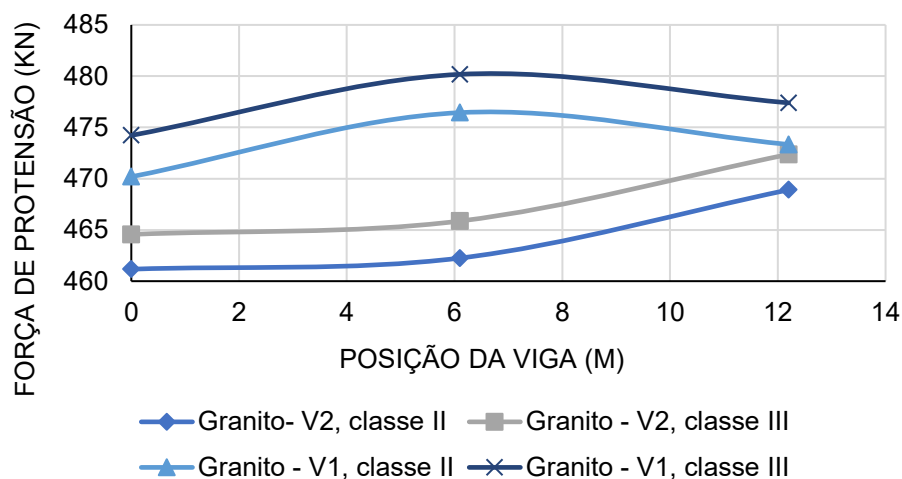


**Fonte: Autora (2021).**

Assim sendo, constata-se que ao utilizar mesma trajetória de cabo, seria mais viável utilizar o agregado basáltico em menor  $f_{ck}$  inicial e dia de protensão mais precoce, isto em comparação ao agregado arenítico em elevados  $f_{cks}$  e dia de protensão mais tardio, pois o basalto gerou perdas significativamente menores do que o arenito nestas condições. Isso se deve ao fato do coeficiente  $\alpha_E$  do basalto ser mais elevado em comparação ao do arenito, gerando assim, maior módulo de elasticidade e por consequência causando a diminuição das perdas. Portanto, devido ao comportamento semelhante em todas as combinações, nota-se que o agregado que produz maior módulo de elasticidade é o que também gera menores perdas de protensão ao longo da vida útil da estrutura.

O Gráfico 20 apresenta a força de protensão final com a combinação do granito em duas classes de agressividade e trajetória de cabo, mantendo o dia de protensão fixo.

**Gráfico 20 - Força de protensão após perdas totais em V1 e V2 aos 28 dias de protensão.**

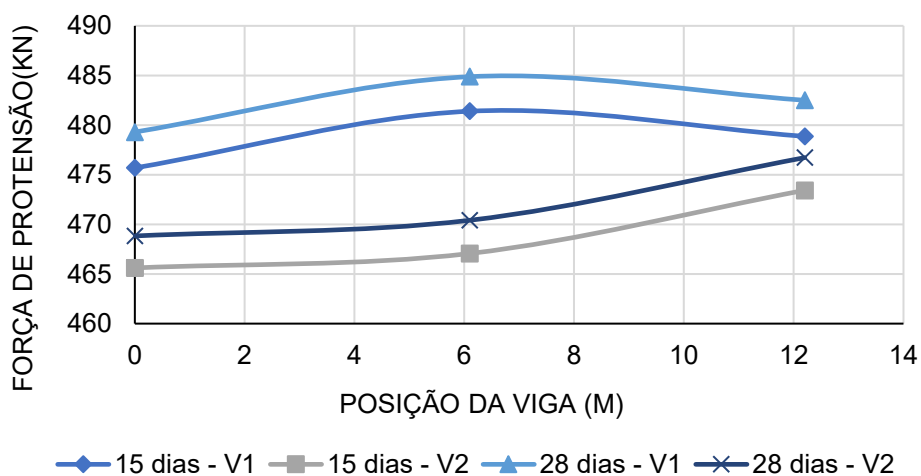


Fonte: Autora (2021).

Desta forma, observa-se que para o mesmo agregado graúdo, idade de protensão e classes de agressividade, V2 gerou maiores perdas de protensão ao longo do cabo de armadura ativa em comparação à V1, para as duas classes de agressividade observadas, mesmo em relação à classe III de V2 em relação a classe II de V1, em que a última conta com menor  $f_{ck}$ .

Utilizando o agregado basalto, com o  $f_{ck}$  adotado para a classe II de agressividade, que é a mais utilizada para protensão, e através da variação das duas idades de estiramento dos cabos e em duas trajetórias de cabo, gerou-se o Gráfico 21.

**Gráfico 21 - Força de protensão após perdas totais em V1 e V2 aos 15 e 28 dias de protensão.**



Fonte: Autora (2021).

Assim sendo, verifica-se que ao utilizar a mesma classe de agressividade para o agregado graúdo, em diferentes idades de protensão e trajetórias do cabo, a idade mais precoce para protensão em V1 continua gerando menores perdas em relação à idade de 28 dias de protensão em V2, que é a que gera menores perdas para essa trajetória. Portanto V1 apresenta perdas de menor magnitude quando comparada à V2 até em sua idade mais precoce para o mesmo agregado.

## 5 CONCLUSÕES

Com a realização de análise das perdas de protensão imediatas e progressivas em vigas biapoiadas com pós-tração foram obtidas as seguintes conclusões:

- As perdas por encurtamento do concreto são de menores magnitudes quando comparadas as outras perdas geradas, sendo praticamente desprezíveis em comparação ao restante das reduções que ocorrem na força de protensão ao longo do tempo.
- As perdas de protensão em vigas biapoiadas foram maiores em cabos de trajetória parabólica em relação às vigas com cabos retos com mesma magnitude de excentricidade no meio do vão, devido ao tipo de apoio dessa viga e carregamentos adotados, fazendo com que a trajetória de cabo reta com excentricidade constante ao longo do cabo fosse a mais adequada para a configuração utilizada.
- Agregados graúdos de maior rigidez como o basalto, resultam em menores perdas totais geradas, devido ao seu elevado módulo de elasticidade em comparação aos outros agregados, que possuem menor rigidez.
- As perdas de protensão são menores em concretos de baixos  $f_{cks}$  iniciais produzidos com agregados graúdos que gerem maiores módulos de elasticidade, em comparação à concretos produzidos com agregados graúdos que resultam em menores módulos de elasticidade, porém com maiores  $f_{cks}$  iniciais.
- A idade inicial de protensão influencia na perda de protensão, gerando menores módulos de elasticidade para a idade mais precoce, aumentando a retração elástica do concreto, e também gerando maiores retrações e fluência ao passar dos anos da vida útil da estrutura, porém a variação não é significativa nas perdas finais de protensão, apresentando valores semelhantes, aos 15 e 28 dias de idade de cura do concreto, nas resultantes de força após todas as perdas calculadas.



## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A sugestão para estudos futuros seria de realizar análise em vigas com seções transversais diferentes da retangular, para que seja comprovado o comportamento sistêmico das perdas de protensão totais quando variado a classe de agressividade ( $f_{ck}$  inicial), traçado do cabo, agregado graúdo e dia de protensão.

## REFERÊNCIAS

ARCELORMITTAL. **Catálogo de fios e cordoalhas para concreto protendido.** Espírito Santo: 2021. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/catalogos>. Acesso em: 27 jul. de 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7480:** Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7482:** Fios de aço para estruturas de concreto protendido - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7483:** Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BASTOS, P. S. **Concreto Protendido.** Notas de Aula, Departamento de Engenharia Civil. São Paulo: Universidade Estadual Paulista Campus de Bauru, Bauru, 2018.

BASTOS, P. S. **Fundamentos do Concreto Protendido.** Departamento de Engenharia Civil. São Paulo: Universidade Estadual Paulista Campus de Bauru, Bauru, 2019.

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

CARVALHO, R. G. de. CUNHA, M. LACERDA, I. G. NETO, E. S. A. PEREIRA, J. L. S. **Concreto Protendido e Lajes Protendidas com Monocordoalhas Engraxadas, Noções Gerais, Solução Estrutural e Correta Execução. Comunidade da Construção,** Associação Brasileira de Cimento Portland, 2005. Disponível em: <https://docplayer.com.br/1991036-Concreto-protendido-e-lajes-protendidas-com-monocordoalhas-engraxadas-noco-es-gerais-solucao-estrutural-e-correta-execucao.html>. Acesso em: 22 julho 2021.

CLIMATE-DATA.ORG. Umidade média da cidade de Toledo-PR. **Clima Toledo.** 15 jun. 2021. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/parana/toledo-31828/>. Acesso em: 17 out. 2021.

FREITAS, M. P. MOURA, M. W.; REAL, M. V.; Análise das Perdas de Protensão em Vigas de Concreto Protendido Pós-Tencionadas. In: X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. 2018, Rio de Janeiro. **Anais da Associação Brasileira de Pontes e Estruturas**, 2018. Trabalho 141. Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos2018/141.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2021.

HANAI, J. B. **Fundamentos do Concreto Protendido**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, 2005. E-book. Disponível em: <https://ecivilufes.files.wordpress.com/2013/11/fundamentos-do-concreto-protendido-hanai-j-b.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2021.

HSIAO, J. K. Prestress Loss Distributions along Simply Supported Pretensioned Concrete Beams. **Electronic Journal of Structural Engineering**, Carbondale, Illinois, v.16, 2016. Disponível em: [https://opensiuc.lib.siu.edu/cee\\_pubs/5/](https://opensiuc.lib.siu.edu/cee_pubs/5/). Acesso em: 24 jul. 2021.

LIBBY, J. R. **Modern Prestressed Concrete: Design Principles and Construction Methods**. 4ª Edição. San Diego, California: Springer Science Business Media, LLC, 1990.

LIMA, J. S. de A. **Concreto Protendido**. Rio de Janeiro: Projeto de Graduação, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Estruturas e Fundações, 2001.

NAAMAN, A. E. **Prestressed Concrete Analysis and Design**. 2ª Edição. Ann Arbor, Michigan: Techno Press, 2004.

PÁEZ, P. M.; SENSALE, B. Improved prediction of long-term prestress loss in unbonded prestressed concrete members. **Engineering Structures**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.07.038>. Acesso em: 17 nov. 2021.

PROTENDE – PROTBAR SISTEMA DE PROTENÇÃO. **Catálogo de sistema de protensão com barras, Classe 1080/1230 – Mpa**. São Paulo: 2021.

SINGH, B.P., YAZDANI, N. RAMIREZ, G. Effect of a Time Dependent Concrete Modulus of Elasticity on Prestress Losses in Bridge Girders. **Int J Concr Struct Mater** 7, 183–191 (2013). Acesso em: <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0037-0>. Acesso em: 7 dez. 2021.

SCHIMID, M. R. L. Concreto Protendido: Por que protender uma estrutura de concreto?. **Revista Concreto & Construções, Ibracon**, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/307007412/Por-Que-Protender-Uma-Estrutura-de-Concreto>. Acesso em: 22 jul. 2021.

TAVARES, M. G. **Simulação da perda de protensão aderente em elementos de concreto**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

VERÍSSIMO, G. S.; CÉSAR JR, K.M.L. **Concreto Protendido – Fundamentos Básicos**. 4 ed. Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, 1998a.

VERÍSSIMO, G.S.; CÉSAR JR, K.M.L. **Concreto Protendido – Perdas de Protensão**. 4 ed. Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, 1998b.

## APÊNDICE A - Resultados das perdas imediatas

**Tabela A. 1 - Perda média por encurtamento em módulo no concreto no meio do vão da V1 (MPa).**

Classe	15 dias				28 dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	11,95	14,34	15,93	20,48	11,41	13,69	15,22	19,56
II	10,90	13,09	14,54	18,69	10,42	12,50	13,89	17,86
III	10,10	12,12	13,46	17,31	9,64	11,57	12,86	16,53
IV	9,44	11,33	12,59	16,19	9,02	10,83	12,03	15,47

Fonte: Autora (2021).

**Tabela A. 2 - Perda média por encurtamento em módulo no concreto em módulo no apoio da V1 (MPa).**

Classe	15 dias				28 dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	20,51	24,62	27,35	35,17	19,60	23,51	26,13	33,59
II	18,72	22,47	24,97	32,10	17,89	21,47	23,85	30,66
III	17,34	20,80	23,11	29,72	16,56	19,87	22,08	28,39
IV	16,22	19,46	21,62	27,80	15,49	18,59	20,66	26,56

Fonte: Autora (2021).

**Tabela A. 3 – Perda média por encurtamento em módulo no concreto no meio do vão da V2 (MPa).**

Classe	15 dias				28 dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	11,95	14,34	15,93	20,48	11,41	13,69	15,22	19,56
II	10,90	13,09	14,54	18,69	10,42	12,50	13,89	17,86
III	10,10	12,12	13,46	17,31	9,64	11,57	12,86	16,53
IV	9,44	11,33	12,59	16,19	9,02	10,83	12,03	15,47

Fonte: Autora (2021).

**Tabela A. 4 - Perda média por encurtamento em módulo no concreto no apoio do vão da V2 (MPa).**

Classe	15 dias				28 dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	6,85	8,22	9,13	11,74	6,54	7,85	8,72	11,22
II	6,25	7,50	8,34	10,72	5,97	7,17	7,96	10,24
III	5,79	6,95	7,72	9,92	5,53	6,64	7,37	9,48
IV	5,41	6,50	7,22	9,28	5,17	6,21	6,90	8,87

Fonte: Autora (2021).

**Tabela A. 5 - Redução da força de protensão devido ao encurtamento elástico do concreto em V1 e V2 no meio do vão (%).**

15 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	1,21	1,45	1,61	2,07	1,21	1,45	1,61	2,07
II	1,10	1,32	1,47	1,89	1,10	1,32	1,47	1,89
III	1,02	1,22	1,36	1,75	1,02	1,22	1,36	1,75
IV	0,95	1,14	1,27	1,64	0,95	1,14	1,27	1,64

28 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	1,15	1,38	1,54	1,98	1,15	1,38	1,54	1,98
II	1,05	1,26	1,40	1,80	1,05	1,26	1,40	1,80
III	0,97	1,17	1,30	1,67	0,97	1,17	1,30	1,67
IV	0,91	1,09	1,21	1,56	0,91	1,09	1,21	1,56

Fonte: Autora (2021).

**Tabela A. 6 - Redução da força de protensão devido ao encurtamento elástico do concreto em V1 e V2 nos apoios (%).**

15 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	2,07	2,49	2,76	3,55	0,69	0,83	0,92	1,19
II	1,89	2,27	2,52	3,24	0,63	0,76	0,84	1,08
III	1,75	2,10	2,33	3,00	0,58	0,70	0,78	1,00
IV	1,64	1,97	2,18	2,81	0,55	0,66	0,73	0,94

28 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	1,98	2,37	2,64	3,39	0,66	0,79	0,88	1,13
II	1,81	2,17	2,41	3,10	0,60	0,72	0,80	1,03
III	1,67	2,01	2,23	2,87	0,56	0,67	0,74	0,96
IV	1,56	1,88	2,09	2,68	0,52	0,63	0,70	0,90

Fonte: Autora (2021).

Tabela A. 7 – Perda por atrito e retrocesso da ancoragem em V1 e V2 (kN).

V1			V2		
Início do vão	Meio do vão	Fim do vão	Início do vão	Meio do vão	Fim do vão
33,63	31,81	29,98	52,76	48,27	43,78

Fonte: Autora (2021).

Tabela A. 8 - Perdas imediatas totais no início do vão em V1 e V2 (kN).

15 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	46,06	48,55	50,21	54,94	56,92	57,75	58,30	59,88
II	44,98	47,25	48,76	53,08	56,55	57,31	57,82	59,26
III	44,14	46,24	47,64	51,64	56,27	56,97	57,44	58,78
IV	43,46	45,42	46,73	50,48	56,05	56,70	57,14	58,39

28 Dias								
Classe	CABO RETO – V1				CABO PARABÓLICO – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	45,50	47,88	49,46	53,99	56,73	57,52	58,05	59,56
II	44,47	46,64	48,08	52,21	56,38	57,11	57,59	58,97
III	43,67	45,67	47,01	50,83	56,12	56,79	57,23	58,51
IV	43,02	44,90	46,15	49,72	55,90	56,53	56,94	58,14

Fonte: Autora (2021).

Tabela A. 9 - Perdas imediatas totais no meio do vão em V1 e V2 (kN).

15 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	39,05	40,49	41,46	44,22	55,51	56,96	57,93	60,68
II	38,41	39,74	40,62	43,13	54,88	56,20	57,08	59,60
III	37,92	39,15	39,96	42,29	54,39	55,62	56,43	58,76
IV	37,53	38,67	39,44	41,62	54,00	55,14	55,90	58,08

28 Dias								
Classe	CABO RETO – V1				CABO PARABÓLICO – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	38,72	40,10	41,03	43,66	55,19	56,57	57,49	60,13
II	38,12	39,38	40,22	42,63	54,59	55,85	56,69	59,10
III	37,65	38,82	39,60	41,83	54,12	55,29	56,07	58,29
IV	37,27	38,37	39,10	41,18	53,74	54,83	55,56	57,65

Fonte: Autora (2021).

**Tabela A. 10 - Perdas imediatas totais no fim do vão em V1 e V2 (kN).**

15 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	42,41	44,90	46,56	51,29	47,93	48,76	49,32	50,90
II	41,33	43,60	45,11	49,43	47,57	48,33	48,83	50,28
III	40,49	42,59	43,99	47,99	47,29	47,99	48,46	49,80
IV	39,81	41,77	43,08	46,83	47,06	47,72	48,16	49,41

28 Dias								
Classe	CABO RETO – V1				CABO PARABÓLICO – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	41,86	44,23	45,81	50,34	47,75	48,54	49,07	50,58
II	40,82	42,99	44,43	48,56	47,40	48,13	48,61	49,99
III	40,02	42,02	43,36	47,19	47,13	47,80	48,25	49,53
IV	39,37	41,25	42,50	46,07	46,92	47,54	47,96	49,16

Fonte: Autora (2021).

**Tabela A. 11 - Força de protensão após perdas imediatas no início do vão em V1 e V2 (kN).**

15 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	553,94	551,45	549,79	545,06	543,08	542,25	541,70	540,12
II	555,02	552,75	551,24	546,92	543,45	542,69	542,18	540,74
III	555,86	553,76	552,36	548,36	543,73	543,03	542,56	541,22
IV	556,54	554,58	553,27	549,52	543,95	543,30	542,86	541,61

28 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	554,50	552,12	550,54	546,01	543,27	542,48	541,95	540,44
II	555,53	553,36	551,92	547,79	543,62	542,89	542,41	541,03
III	556,33	554,33	552,99	549,17	543,88	543,21	542,77	541,49
IV	556,98	555,10	553,85	550,28	544,10	543,47	543,06	541,86

Fonte: Autora (2021).



**Tabela A. 12 - Força de protensão após perdas imediatas no meio do vão em V1 e V2 (kN).**

15 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	560,95	559,51	558,54	555,78	544,49	543,04	542,07	539,32
II	561,59	560,26	559,38	556,87	545,12	543,80	542,92	540,40
III	562,08	560,85	560,04	557,71	545,61	544,38	543,57	541,24
IV	562,47	561,33	560,56	558,38	546,00	544,86	544,10	541,92

28 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	561,28	559,90	558,97	556,34	544,81	543,43	542,51	539,87
II	561,88	560,62	559,78	557,37	545,41	544,15	543,31	540,90
III	562,35	561,18	560,40	558,17	545,88	544,71	543,93	541,71
IV	562,73	561,63	560,90	558,82	546,26	545,17	544,44	542,35

Fonte: Autora (2021).

**Tabela A. 13 - Força de protensão após perdas imediatas no fim do vão em V1 e V2 (kN).**

15 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	557,59	555,10	553,44	548,71	552,07	551,24	550,68	549,10
II	558,67	556,40	554,89	550,57	552,43	551,67	551,17	549,72
III	559,51	557,41	556,01	552,01	552,71	552,01	551,54	550,20
IV	560,19	558,23	556,92	553,17	552,94	552,28	551,84	550,59

28 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	558,14	555,77	554,19	549,66	552,25	551,46	550,93	549,42
II	559,18	557,01	555,57	551,44	552,60	551,87	551,39	550,01
III	559,98	557,98	556,64	552,81	552,87	552,20	551,75	550,47
IV	560,63	558,75	557,50	553,93	553,08	552,46	552,04	550,84

Fonte: Autora (2021).

**Tabela A. 14 - Redução da força de protensão após perdas imediatas no início do vão em V1 e V2 (%).**

15 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	7,68	8,09	8,37	9,16	9,49	9,62	9,72	9,98
II	7,50	7,87	8,13	8,85	9,43	9,55	9,64	9,88
III	7,36	7,71	7,94	8,61	9,38	9,50	9,57	9,80
IV	7,24	7,57	7,79	8,41	9,34	9,45	9,52	9,73

28 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	7,58	7,98	8,24	9,00	9,45	9,59	9,68	9,93
II	7,41	7,77	8,01	8,70	9,40	9,52	9,60	9,83
III	7,28	7,61	7,84	8,47	9,35	9,46	9,54	9,75
IV	7,17	7,48	7,69	8,29	9,32	9,42	9,49	9,69

Fonte: Autora (2021).

**Tabela A. 15 - Redução da força de protensão após perdas imediatas no meio do vão em V1 e V2 (%).**

15 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	6,51	6,75	6,91	7,37	9,25	9,49	9,65	10,11
II	6,40	6,62	6,77	7,19	9,15	9,37	9,51	9,93
III	6,32	6,52	6,66	7,05	9,07	9,27	9,41	9,79
IV	6,25	6,45	6,57	6,94	9,00	9,19	9,32	9,68

28 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	6,45	6,68	6,84	7,28	9,20	9,43	9,58	10,02
II	6,35	6,56	6,70	7,10	9,10	9,31	9,45	9,85
III	6,28	6,47	6,60	6,97	9,02	9,21	9,34	9,72
IV	6,21	6,39	6,52	6,86	8,96	9,14	9,26	9,61

Fonte: Autora (2021).

**Tabela A. 16 - Redução da força de protensão após perdas imediatas no fim do vão em V1 e V2 (%).**

15 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	7,07	7,48	7,76	8,55	7,99	8,13	8,22	8,48
II	6,89	7,27	7,52	8,24	7,93	8,05	8,14	8,38
III	6,75	7,10	7,33	8,00	7,88	8,00	8,08	8,30
IV	6,63	6,96	7,18	7,80	7,84	7,95	8,03	8,23
28 Dias								
Classe	Cabo reto – V1				Cabo parabólico – V2			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	6,98	7,37	7,64	8,39	7,96	8,09	8,18	8,43
II	6,80	7,16	7,41	8,09	7,90	8,02	8,10	8,33
III	6,67	7,00	7,23	7,86	7,86	7,97	8,04	8,25
IV	6,56	6,87	7,08	7,68	7,82	7,92	7,99	8,19

Fonte: Autora (2021).

## APÊNDICE B - Resultados das perdas progressivas

**Tabela B. 1 - Perdas progressivas devidas à retração e fluência do concreto em V1 e V2 no início do vão (MPa).**

Modelo de viga V1								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	113,96	128,37	137,73	163,48	111,93	126,32	135,75	161,95
II	107,54	120,88	129,57	153,55	105,56	118,83	127,53	151,79
III	102,50	114,99	123,14	145,69	100,57	112,96	121,09	143,79
IV	98,40	110,19	117,90	139,25	96,52	108,19	115,85	137,28

Modelo de viga V2								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	107,95	121,19	129,80	153,53	106,03	119,22	127,87	151,95
II	102,06	114,31	122,30	144,38	100,19	112,36	120,34	142,62
III	97,43	108,90	116,39	137,13	95,62	106,97	114,43	135,27
IV	93,67	104,49	111,57	131,20	91,91	102,60	109,62	129,28

Fonte: Autora (2021).

**Tabela B. 2 - Perdas progressivas devidas à retração e fluência do concreto em V1 e V2 no meio do vão (MPa).**

Modelo de viga V1								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	115,27	130,16	139,88	166,81	109,11	122,77	131,70	156,46
II	108,67	122,41	131,40	156,38	103,06	115,67	123,93	146,88
III	103,49	116,33	124,75	148,17	98,31	110,09	117,81	139,32
IV	99,29	111,39	119,33	141,46	94,46	105,55	112,83	133,15

Modelo de viga V2								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	112,20	126,50	136,05	161,70	106,29	119,42	128,00	151,78
II	105,84	119,05	127,84	151,69	100,47	112,59	120,53	142,58
III	100,87	113,21	121,41	143,80	95,91	107,23	114,65	135,32
IV	96,83	108,46	116,10	137,36	92,21	102,87	109,87	129,39

Fonte: Autora (2021).

**Tabela B. 3 - Perdas progressivas devidas à retração e fluência do concreto em V1 e V2 no fim do vão (MPa).**

Modelo de viga V1								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	114,65	129,18	138,63	164,62	108,57	121,93	130,62	154,57
II	108,16	121,62	130,39	154,59	102,63	114,99	123,06	145,33
III	103,08	115,68	123,91	146,66	97,96	109,53	117,09	138,02
IV	98,95	110,84	118,62	140,16	94,17	105,08	112,22	132,04

Modelo de viga V2								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	113,61	128,32	137,95	164,74	107,56	121,05	129,89	154,50
II	107,10	120,66	129,56	154,35	101,60	114,03	122,20	144,96
III	102,00	114,66	122,97	146,18	96,93	108,53	108,45	137,45
IV	97,86	109,78	117,62	139,52	93,14	104,06	111,24	131,33

Fonte: Autora (2021).

**Tabela B. 4 - Perdas progressivas em módulo devidas relaxação relativa do aço em V1 e V2 no início do vão (MPa).**

Modelo de viga V1								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	22,96	22,02	21,41	19,73	23,35	22,49	21,93	20,38
II	23,38	22,51	21,94	20,38	23,73	22,93	22,41	20,98
III	23,70	22,89	22,36	20,89	24,03	23,29	22,80	21,45
IV	23,97	23,20	22,70	21,31	24,28	23,57	23,52	21,83

Modelo de viga v2								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	22,51	21,66	21,10	19,57	22,87	22,10	21,59	20,18
II	22,88	22,10	21,59	20,16	23,22	22,50	22,03	20,73
III	23,18	22,45	21,97	20,63	23,48	22,82	22,38	21,16
IV	23,42	22,73	22,28	21,01	23,70	23,07	22,66	21,51

Fonte: Autora (2021).

**Tabela B. 5 - Perdas progressivas em módulo devidas relaxação relativa do aço em V1 e V2 no meio do vão (MPa).**

<b>Modelo de viga V1</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	23,25	22,34	21,74	20,09	23,64	22,80	22,25	20,74
<b>II</b>	23,66	22,81	22,26	20,73	24,01	23,24	22,73	21,33
<b>III</b>	23,97	23,18	22,67	21,23	24,30	23,58	23,10	21,79
<b>IV</b>	24,23	23,49	23,00	21,64	24,54	23,86	23,41	22,17

<b>Modelo de viga v2</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	22,57	21,69	21,15	19,54	22,94	22,14	21,61	20,16
<b>II</b>	22,96	22,15	21,64	20,15	23,29	22,55	22,07	20,72
<b>III</b>	23,26	22,50	22,03	20,63	23,57	22,88	22,43	21,17
<b>IV</b>	23,51	22,79	22,33	21,03	23,80	23,15	22,72	21,53

Fonte: Autora (2021).

**Tabela B. 6 - Perdas progressivas em módulo devidas relaxação relativa do aço em V1 e V2 no fim do vão (MPa).**

<b>Modelo de viga V1</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	23,11	22,16	21,55	19,85	23,50	22,63	22,07	20,51
<b>II</b>	23,53	22,65	22,08	20,51	23,89	23,09	22,56	21,11
<b>III</b>	23,86	23,04	22,51	21,02	24,19	23,44	22,95	21,59
<b>IV</b>	24,13	23,36	22,85	21,45	24,44	23,73	23,27	21,98

<b>Modelo de viga v2</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	22,88	21,46	21,44	19,87	23,25	22,46	21,94	20,50
<b>II</b>	23,27	22,46	21,94	20,48	23,61	22,87	22,39	21,06
<b>III</b>	23,57	22,82	22,33	20,96	23,88	23,20	22,75	21,50
<b>IV</b>	23,81	23,11	22,64	21,35	24,10	23,46	23,04	21,86

Fonte: Autora (2021).

**Tabela B. 7 - Perdas progressivas totais em V1 e V2 no início do vão (kN).**

<b>Modelo de viga v1</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	82,97	91,13	96,44	111,03	79,57	87,07	91,95	105,39
<b>II</b>	79,33	86,89	91,82	105,40	76,23	83,17	87,70	100,21
<b>III</b>	76,48	83,56	88,17	100,95	73,61	80,11	84,35	96,10
<b>IV</b>	74,16	80,84	85,20	97,30	71,48	77,61	81,86	92,74

<b>Modelo de viga v2</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	81,47	89,68	95,05	110,00	78,11	85,64	90,57	104,31
<b>II</b>	77,84	85,40	90,37	104,20	74,79	81,72	86,28	98,99
<b>III</b>	74,99	82,06	86,69	99,64	72,18	78,65	82,91	94,79
<b>IV</b>	72,68	79,34	83,71	95,93	70,06	76,16	80,16	91,38

Fonte: Autora (2021).

**Tabela B. 8 - Perdas progressivas totais em V1 e V2 no meio do vão (kN).**

<b>Modelo de viga v1</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	83,94	92,41	97,94	113,26	80,44	88,22	93,29	107,39
<b>II</b>	80,19	88,00	93,12	107,33	77,00	84,18	88,87	101,93
<b>III</b>	77,24	84,55	89,34	102,66	74,30	81,00	85,39	97,63
<b>IV</b>	74,85	81,74	86,25	98,84	72,11	78,42	82,56	94,12

<b>Modelo de viga v2</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	81,67	89,80	95,26	109,83	78,31	85,78	90,66	104,20
<b>II</b>	78,05	85,57	90,59	104,13	75,00	81,90	86,41	98,96
<b>III</b>	75,22	82,24	86,93	99,65	72,41	78,85	83,07	94,83
<b>IV</b>	72,92	79,54	83,88	95,98	70,30	76,37	80,35	91,46

Fonte: Autora (2021).

**Tabela B. 9 - Perdas progressivas totais em V1 e V2 no fim do vão (kN).**

<b>Modelo de viga v1</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	83,48	91,71	97,07	111,79	80,04	87,60	92,53	106,09
<b>II</b>	79,81	87,43	92,40	106,11	76,67	83,68	88,24	100,86
<b>III</b>	76,93	84,07	88,73	101,61	74,03	80,58	84,86	96,72
<b>IV</b>	74,58	81,32	85,73	97,93	71,88	78,06	82,11	93,33

<b>Modelo de viga v2</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	82,72	90,77	96,59	111,87	79,28	86,97	92,01	106,05
<b>II</b>	79,00	86,73	91,81	105,94	75,88	82,97	87,62	100,61
<b>III</b>	76,09	83,31	88,05	101,28	73,21	79,83	79,51	96,32
<b>IV</b>	73,74	80,53	85,00	97,49	71,05	77,28	81,37	92,83

**Fonte: Autora (2021).**



## APÊNDICE C - Resultados perdas totais

**Tabela C. 1 - Perdas totais em V1 e V2 no início do vão após 50 anos (kN).**

Modelo de viga v1								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	129,04	139,68	146,65	165,97	125,07	134,95	141,41	159,38
II	124,31	134,14	140,58	158,48	120,70	129,81	135,78	152,42
III	120,62	129,79	135,81	152,59	117,27	125,78	131,36	146,94
IV	117,61	126,26	131,94	147,78	114,49	122,50	128,01	142,46

Modelo de viga v2								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	138,39	147,42	153,35	169,88	134,84	143,16	148,62	163,87
II	134,39	142,71	148,18	163,46	131,17	138,83	143,87	144,29
III	131,26	139,03	144,13	158,42	128,29	135,44	140,14	153,30
IV	128,73	136,04	140,85	154,32	125,96	132,68	137,11	149,52

Fonte: Autora (2021).

**Tabela C. 2 - Perdas totais em V1 e V2 no meio do vão após 50 anos (kN).**

Modelo de viga v1								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	122,99	132,91	139,40	157,48	119,17	128,32	134,32	151,05
II	118,60	127,74	133,74	150,46	115,12	123,56	129,10	144,56
III	115,17	123,70	129,30	144,95	111,95	119,82	124,99	139,46
IV	112,38	120,41	125,69	140,46	109,38	116,79	121,66	135,30

Modelo de viga v2								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	137,18	146,76	153,19	170,52	133,50	142,35	148,16	164,33
II	132,93	141,77	147,67	163,74	129,59	137,75	143,10	158,06
III	129,61	137,86	143,36	158,41	126,52	134,13	139,14	153,12
IV	126,92	131,26	139,79	154,06	124,04	131,20	135,91	149,10

Fonte: Autora (2021).

Tabela C. 3 - Perdas totais em V1 e V2 no fim do vão após 50 anos (kN).

Modelo de viga v1								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	125,89	136,61	143,62	163,08	121,89	131,84	138,34	156,43
II	121,14	131,03	137,51	155,54	117,49	126,67	132,68	149,43
III	117,41	126,65	132,72	149,60	114,05	122,61	128,23	143,91
IV	114,39	123,10	128,81	144,76	111,25	119,31	124,60	139,41

Modelo de viga v2								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	130,65	139,53	145,91	162,77	127,02	135,51	141,08	156,63
II	126,57	135,06	140,64	156,22	123,28	131,09	136,23	150,59
III	123,38	131,30	136,51	151,08	120,34	127,63	127,76	145,85
IV	120,80	128,25	133,16	146,89	117,96	124,82	129,33	141,99

Fonte: Autora (2021).

Tabela C. 4 - Força de protensão em V1 e V2 no início do vão após 50 anos (kN).

Modelo de viga v1								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	470,96	460,32	453,35	434,03	474,93	465,05	458,59	440,62
II	475,69	465,86	459,42	441,52	479,30	470,19	464,22	447,58
III	479,38	470,21	464,19	447,41	482,73	474,22	468,64	453,06
IV	482,39	473,74	468,06	452,22	485,51	477,50	471,99	457,54

Modelo de viga v2								
Classe	15 Dias				28 Dias			
	Basalto	Granito	Calcário	Arenito	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
I	461,61	452,58	446,65	430,12	465,16	456,84	451,38	436,13
II	465,61	457,29	451,82	436,54	468,83	461,17	456,13	455,71
III	468,74	460,97	455,87	441,58	471,71	464,56	459,86	446,70
IV	471,27	463,96	459,15	445,68	474,04	467,32	462,89	450,48

Fonte: Autora (2021).

**Tabela C. 5 - Força de protensão em V1 e V2 no meio do vão após 50 anos (kN).**

<b>Modelo de viga v1</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	477,01	467,09	460,60	442,52	480,83	471,68	465,68	448,95
<b>II</b>	481,40	472,26	466,26	449,54	484,88	476,44	470,90	455,44
<b>III</b>	484,83	476,30	470,70	455,05	488,05	480,18	475,01	460,54
<b>IV</b>	487,62	479,59	474,31	459,54	490,62	483,21	478,34	464,70

<b>Modelo de viga v2</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	462,82	453,24	446,81	429,48	466,50	457,65	451,84	435,67
<b>II</b>	467,07	458,23	452,33	436,26	470,41	462,25	456,90	441,94
<b>III</b>	470,39	462,14	456,64	441,59	473,48	465,87	460,86	446,88
<b>IV</b>	473,08	468,74	460,21	445,94	475,96	468,80	464,09	450,90

Fonte: Autora (2021).

**Tabela C. 6 - Força de protensão em V1 e V2 no fim do vão após 50 anos (kN).**

<b>Modelo de viga v1</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	474,11	463,39	456,38	436,92	478,11	468,16	461,66	443,57
<b>II</b>	478,86	468,97	462,49	444,46	482,51	473,33	467,32	450,57
<b>III</b>	482,59	473,35	467,28	450,40	485,95	477,39	471,77	456,09
<b>IV</b>	485,61	476,90	471,19	455,24	488,75	480,69	475,40	460,59

<b>Modelo de viga v2</b>								
<b>Classe</b>	<b>15 Dias</b>				<b>28 Dias</b>			
	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>	<b>Basalto</b>	<b>Granito</b>	<b>Calcário</b>	<b>Arenito</b>
<b>I</b>	469,35	460,47	454,09	437,23	472,98	464,49	458,92	443,37
<b>II</b>	473,43	464,94	459,36	443,78	476,72	468,91	463,77	449,41
<b>III</b>	476,62	468,70	463,49	448,92	479,66	472,37	472,24	454,15
<b>IV</b>	479,20	471,75	466,84	453,11	482,04	475,18	470,67	458,01

Fonte: Autora (2021).