

Análise das Perdas de Protensão em Vigas de Concreto Protendido Pós-Tracionadas

Matheus Paiva de Freitas¹, Mauro de Vasconcellos Real², Márcio Wrague Moura³

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica – PPGEO / Universidade Federal do Rio Grande - FURG/ matheuspfreitas@yahoo.com.br

²Universidade Federal do Rio Grande - FURG / Escola de Engenharia - EE / mauroreal@furg.br

³Universidade Federal do Rio Grande - FURG / Escola de Engenharia - EE / mwmoura@furg.br

Resumo

O cálculo das perdas de protensão é indispensável para a otimização e economia no projeto de elementos estruturais protendidos. Vigas de concreto protendido pós-tracionadas sofrem a ação de uma força inicial de protensão relacionada com o alongamento da armadura ativa. A utilização de macacos, elementos para ancoragem e a liberação dos cabos diminuem a força inicial, chamada de perda de protensão inicial ou imediata. Já a retração e a fluência do concreto, bem como a relaxação do aço de protensão, provocam perdas que aumentam ao longo do tempo, chamadas de perdas diferidas. Através da estimativa destas perdas é possível determinar uma sobretensão a ser aplicada na viga de forma que a força inicial aplicada continue sendo capaz de neutralizar ou reduzir os esforços de tração advindos do carregamento. Este trabalho busca, então, analisar e estudar fatores relevantes para as perdas como: resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), resistência característica à tração do aço de protensão (f_{ptk}), idade do concreto no ato da protensão (t_0), relação carga variável/carga permanente r (q_k/g_k) e o tipo de aço a ser utilizado. Além disso, as diferenças de alguns métodos de cálculos apresentados na NBR 6118/2014 são ressaltadas. As perdas de protensão foram calculadas utilizando uma planilha eletrônica automatizada elaborada com base na norma para dimensionamento de estruturas de concreto protendido. Esta planilha foi verificada comparando vigas já calculadas em outros trabalhos. Variando os fatores mencionados, pôde-se constatar que as perdas de protensão diminuem a medida que o f_{ck} do concreto e o tempo de cura aumentam. O aço de protensão de relaxação baixa (RB) mostrou-se bem mais efetivo com relação a diminuição de perdas do que o aço de protensão de relaxação normal (RN). Por fim, quanto maior a proporção da carga variável em relação a carga permanente, maiores são as perdas de protensão.

Palavras-chave

Perdas de Protensão; Concreto Protendido; Pós-tração; Vigas Protendidas

Introdução

As vigas de concreto protendido pós-tracionadas são submetidas à uma força inicial de protensão que possui relação com o alongamento do aço de protensão. Diversos fatores como a utilização dos macacos, elementos de ancoragem e a própria liberação dos cabos geram a diminuição da força inicial de protensão aplicada. Esta diminuição é denominada perda de protensão.

Pode-se definir de forma mais clara a perda de protensão como sendo as reduções que ocorrem na força de protensão ao longo da vida útil do elemento estrutural protendido. Elas são divididas em dois tipos: perdas imediatas e perdas diferidas (progressivas).

O objetivo deste trabalho é analisar, estudar e avaliar os principais fatores que contribuem para as perdas de protensão, bem como as diferenças apresentadas pelos diferentes métodos de cálculo apresentados na norma. Verificar as influências da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), resistência característica à tração do aço de protensão (f_{ptk}), idade do concreto no ato da protensão (t_0), relação carga variável/carga permanente, tipo de aço a ser utilizado (RB ou RN), enfim, os principais elementos relacionados ao dimensionamento de estruturas em concreto protendido.

Através deste estudo será possível identificar quais destes aspectos mais afetam as perdas de protensão e de posse dessas informações otimizar os dimensionamentos de vigas de concreto protendido pós-tracionadas para que seja realizado de forma mais confiável e segura.

Inicialmente os conceitos de perdas protensão serão abordados, bem como as indicações da NBR 6118/2014 para os cálculos de perdas diferidas. Foi elaborada uma planilha eletrônica automatizada utilizando os critérios apresentados pela norma para o dimensionamento de estruturas de concreto protendido e cálculo das perdas de protensão. Esta planilha foi verificada através da comparação com dimensionamento já realizado por outro autor e, após esta verificação, foram calculadas as perdas de protensão referentes a 108 vigas, variando os fatores mencionados anteriormente. Por fim, a análise dos resultados será realizada ressaltando os principais pontos observados.

Perdas de Protensão Imediatas

São as perdas que acontecem no momento da transferência da força de protensão para o elemento estrutural, portanto, são as perdas que dependem do sistema construtivo adotado.

As perdas imediatas podem ser divididas em três tipos: perdas por atrito, perdas por acomodação nas ancoragens e perdas por encurtamento elástico do concreto (Pfeil, 1988).

Perdas por atrito tratam-se de perdas relativas ao atrito que ocorre entre os cabos de protensão e entre os cabos e as bainhas metálicas onde estão inseridos. Este atrito ocorre no momento que os cabos são tracionados, fazendo com que os cabos entrem em contato direto entre si e com a superfície interna da bainha (Bastos, 2015).

Perdas por acomodação nas ancoragens ocorrem após a aplicação da força de protensão nos cabos onde eles são ancorados nas extremidades das vigas com a utilização de cunhas, ocorrendo uma deformação delas e um pequeno retrocesso do cabo. Este pequeno retrocesso faz com que ocorra uma redução do alongamento inicial do cabo, provocando uma perda de protensão.

E perdas por encurtamento elástico acontecem quando o elemento estrutural de concreto recebe a força de protensão e acaba sofrendo uma pequena deformação elástica. Ao mesmo tempo, o aço de protensão também se deforma, encurtando juntamente com a peça de concreto, provocando um alívio de tensão, que se chama de perda de protensão.

Perdas de Protensão Diferidas

As perdas diferidas ocorrem após a transferência da força de protensão para a viga, se prolongando por toda vida útil da estrutura.

Estas perdas são relacionadas com as deformações provocadas pelas características físico-químicas dos materiais envolvidos (Veríssimo & César Jr, 1998). Elas podem ser divididas em três tipos: perdas por retração do concreto, perdas por fluência do concreto e perdas por relaxação do aço de protensão.

A retração do concreto ocorre devido à perda de umidade para o ambiente externo. Ele perde uma parte do excesso de água não aproveitada pela cura até atingir uma umidade estável, fazendo com que essa perda gradativa provoque uma redução de volume e encurtamento da peça ao longo do tempo (Moura, 2004).

A fluência do concreto é o aumento de deformação ao longo do tempo, quando a viga está submetida a uma carga constante. Ela é afetada pelos mesmos fatores da retração, e é inversamente proporcional à resistência do concreto e diretamente proporcional às tensões nele aplicadas. Portanto, no caso da protensão, uma carga é aplicada previamente e ao longo da vida útil da estrutura, causando o encurtamento do concreto na região da armadura protendida.

A relaxação do aço é o alívio de tensão que a armadura de protensão sofre ao ser estirada e mantida com comprimento e deformação constante (Veríssimo & César Jr, 1998).

Cálculo das Perdas Diferidas segundo a NBR 6118/2014

As perdas diferidas podem ser calculadas de forma isolada, porém há estudos que mostram que a soma das três parcelas de perdas diferidas resulta num valor maior do que o experimental.

Isto se deve ao fato de que a retração e fluência do concreto encurtarem o cabo, reduzindo o efeito da relaxação, bem como a relaxação do aço reduz a compressão do concreto, reduzindo a fluência. Portanto, esta soma representa um teto de segurança para o cálculo.

Desta forma, a NBR 6118/2014 prevê métodos de cálculo que levam em conta todos estes efeitos de forma concomitante.

Processo simplificado

Para ser possível sua utilização algumas condições devem ser satisfeitas, tais como:

- A concretagem e protensão serem executadas em fases suficientemente próximas para serem desprezados os efeitos recíprocos de uma fase na outra;
- Os cabos possuam afastamentos entre si suficientemente pequenos em relação à altura da viga, de forma que possam ser considerados um cabo resultante, onde a área da seção transversal será igual à soma das áreas das seções dos cabos que o compõem e está posicionado na resultante dos esforços atuantes.

Cumprindo essas condições, a seguinte fórmula pode ser utilizada para o cálculo das perdas diferidas:

$$\Delta\sigma_p(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{cs}(t, t_0)E_p - \alpha_p\sigma_{c,p0g}\varphi(t, t_0) - \sigma_{p0}\chi(t, t_0)}{\chi_p + \chi_c\alpha_p\eta\rho_p} \quad (1)$$

Processo aproximado

A NBR 6118/2014 também permite um cálculo aproximado das perdas diferidas, onde além das condições anteriores do processo simplificado, a retração ε_{cs} não pode diferir mais de 25% do valor $-8.10^{-5}\varphi(\infty, t_0)$.

Satisfeitas essas condições, para aços de relaxação normal (RN) o valor das perdas de tensão relativas à fluência, retração e relaxação é dado por:

$$\frac{\Delta\sigma_p(t_\infty, t_0)}{\sigma_{p0}} = 18,1 + \frac{\alpha_p}{47} [\varphi(t_\infty, t_0)]^{1,57} (3 + \sigma_{c,p0g}) \quad (2)$$

E para aços de relaxação baixa (RB):

$$\frac{\Delta\sigma_p(t_\infty, t_0)}{\sigma_{p0}} = 7,4 + \frac{\alpha_p}{18,7} [\varphi(t_\infty, t_0)]^{1,07} (3 + \sigma_{c,p0g}) \quad (3)$$

Modelo de Cálculo

A metodologia de cálculo adotada, foi a proposta na NBR 6118/2014, onde através das verificações de Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS) as Forças de Protensão são calculadas e verificadas.

O procedimento ocorre de maneira inversa ao do concreto armado, onde o dimensionamento das armaduras é realizado determinando a força e a armadura de protensão conforme as verificações dos ELS e verificados quanto aos ELU.

Uma planilha eletrônica foi desenvolvida com cada etapa do processo de dimensionamento, verificações e cálculo das perdas de protensão em vigas de concreto protendido.

Para utilizar a planilha, primeiramente é necessário informar a geometria da viga, onde a planilha realiza os cálculos necessários a respeito das propriedades geométricas. Logo após, a planilha solicita a informação do f_{ck} e propriedades reológicas do concreto, utilizando os valores informados para calcular os fatores de resistência necessários, bem como o coeficiente de fluência e deformação de retração (baseados nas formulações propostas na NBR 6118/2014). Além disso, a resistência característica à tração do aço passivo e o módulo de elasticidade também necessitam ser informados, assim como a resistência característica à tração e módulo de elasticidade do aço de protensão.

Informando o vão da viga, cargas permanentes, cargas variáveis e os devidos coeficientes de ponderação, a planilha realiza o cálculo dos esforços solicitantes para cada combinação de ações. No passo seguinte, é informado o nível de protensão (parcial, limitada ou completa) e tipo de aço (RB ou RN) e a planilha realiza o cálculo e

verificações das combinações de ações necessárias, obtendo como resultado a armadura de protensão necessária.

Na próxima etapa entra o que realmente interessa para este estudo, o momento que as perdas de protensão são calculadas. A respeito das perdas imediatas, basta informar o coeficiente de atrito, penetração da cunha e o número de cabos, que as perdas por atrito, ancoragem e encurtamento elástico serão calculadas. Para as perdas diferidas não é necessário informar nenhum dado, visto que as fórmulas propostas pela norma, e mencionadas no capítulo anterior, já estão devidamente programadas.

Por fim, a planilha realiza diversas verificações dos ELU, tanto em vazio como em serviço, além do dimensionamento ao esforço cortante e verificação da flecha e fissuração.

Verificação

Para realizar a verificação da planilha eletrônica desenvolvida, foi utilizada a dissertação de mestrado de Klein (2002). O autor elaborou um programa que resolve vigas simplesmente apoiadas de concreto protendido, e realizou o dimensionamento de algumas vigas no seu estudo.

No exemplo avaliado, a protensão é completa e a viga possui a geometria exposta na Figura 1:

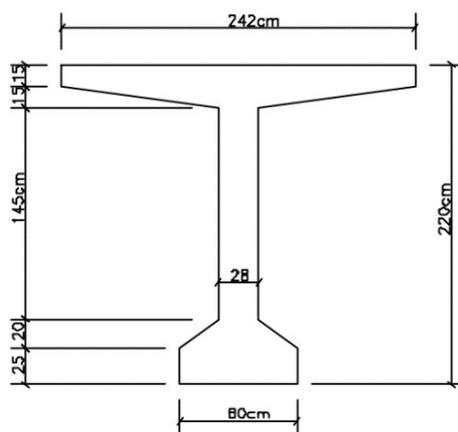


Figura 1 - Geometria Verificação (Klein, 2002)

Além disso, a viga possui um vão de 25 metros, a resistência característica à compressão (f_{ck}) é de 30MPa, o aço passivo é o CA50, o aço de protensão é o CP-190-RB, a carga permanente g_2 vale 13kN/m e a carga variável q vale 65kN/m.

A partir destes dados a viga foi dimensionada utilizando a planilha eletrônica desenvolvida e os resultados obtidos foram comparados com os obtidos pelo autor. Como pode-se observar na Tabela 1 a seguir, os resultados foram bastante similares, comprovando a eficácia da planilha.

Tabela 1 - Verificação

VERIFICAÇÃO PLANILHA ELETRÔNICA		
ITEM	RESULTADO DO AUTOR	RESULTADO DA PLANILHA
A_p (cm ²)	40,10	40,40
P_i (kN)	5620,00	5641,00
P_∞ (kN)	4347,00	4304,00

Estudos Paramétricos

Com o objetivo de estudar as variantes no que diz respeito às perdas de protensão em vigas de concreto protendido pós-tracionadas, foi definida uma seção típica para realização dos dimensionamentos e cálculos. O vão adotado foi de 20 metros e a seção da viga pode ser verificada na Figura 2 a seguir:

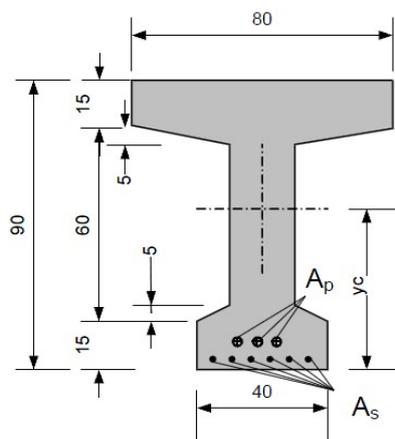


Figura 2 - Seção Transversal Viga do Estudo

Definida as propriedades geométricas das vigas a serem dimensionadas, as propriedades mecânicas dos materiais necessitam ser escolhidas. É neste momento que começam a entrar os fatores a serem avaliados.

As vigas foram projetadas para as resistências características à compressão do concreto (f_{ck}) com valor de 40MPa, 50MPa e 60MPa. Ainda, considerou-se dois tipos de aço de protensão, o CP-190, com resistência característica à tração (f_{ptk}) de 1900MPa, e o CP-210, com f_{ptk} de 2100MPa, ambos com as variações RB e RN.

A respeito do tipo de protensão, em todas as vigas dimensionadas a protensão Limitada (Nível 2) foi adotada e a idade do concreto no ato de protensão foi utilizada com os valores de 7, 14 e 28 dias. Já quanto ao carregamento, a carga total foi mantida fixa no valor de 34,50kN/m, e definiu-se um índice r , que representa a relação entre carga variável (q) e carga permanente (g), em que o carregamento foi variado utilizando r como 0,5, 1,0 e 2.

De posse de todos estes dados, utilizando a planilha eletrônica desenvolvida, e devidamente verificada, os dimensionamentos foram realizados e os resultados obtidos. Ao todo foram dimensionadas 108 vigas. No que diz respeito às perdas diferidas os três resultados possíveis foram calculados, tanto utilizando todos os efeitos ao longo do tempo somados de forma separada, como as 2 formulações propostas pela NBR 6118/2014.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos das vigas que serão utilizadas para ressaltar os pontos da análise:

Tabela 2 - Resultados

VIGA	ATRIBUTOS				FORÇAS DE PROTENSÃO		MÉTODO DE CÁLCULO					
	f_{ck} (MPa)	q_k/g_k	t_0	Aço	P_i (kN)	P_o (kN)	SOMA		APROXIMADO		SIMPLIFICADO	
							P_{∞} (kN)	r_{∞}	P_{∞} (kN)	r_{∞}	P_{∞} (kN)	r_{∞}
V02	40	1	7	RB	2832,44	2635,26	1948,79	31,20%	2084,12	26,42%	2120,56	25,13%
V16	40	0,5	28	RN	3408,14	3124,24	2058,22	39,61%	2357,58	30,82%	2387,90	29,94%
V20	50	1	7	RB	2832,44	2642,62	2116,21	25,29%	2248,05	20,63%	2224,06	21,48%
V22	50	0,5	14	RB	3398,93	3130,73	2538,11	25,33%	2687,52	20,93%	2669,70	21,45%
V23	50	1	14	RB	2832,44	2642,62	2145,01	24,27%	2271,94	19,79%	2244,17	20,77%
V24	50	2	14	RB	2549,20	2384,18	1909,42	25,10%	2030,27	20,36%	1998,09	21,62%
V25	50	0,5	28	RB	3398,93	3130,73	2574,52	24,26%	2714,74	20,13%	2694,74	20,72%
V34	50	0,5	28	RN	3408,14	3139,15	2238,30	34,32%	2484,11	27,11%	2477,79	27,30%
V38	60	1	7	RB	2832,44	2648,11	2144,90	24,27%	2274,28	19,71%	2241,37	20,87%
V41	60	1	14	RB	2832,44	2648,11	2171,09	23,35%	2295,63	18,95%	2260,09	20,21%
V44	60	1	28	RB	2832,44	2648,11	2198,37	22,39%	2315,77	18,24%	2280,12	19,50%
V74	50	1	7	RB	2817,54	2633,70	2145,32	23,86%	2241,55	20,44%	2239,74	20,51%

Através destes dados obtidos, pode-se analisar a influência de cada um dos atributos variados no dimensionamento. Para ilustrar de forma mais clara, a análise será realizada ressaltando o que cada atributo influenciou no resultado das perdas de protensão.

Primeiramente, a respeito do f_{ck} , para efeitos de análise foram observadas as vigas V02, V20 e V38, onde a relação r , o t_0 , o tipo de aço e a resistência característica à tração do aço (f_{ptk}) foram mantidos constantes, variando apenas o f_{ck} em 40MPa, 50MPa e 60MPa. Pode-se verificar então que as perdas de protensão diminuem a medida que o f_{ck} aumenta. Isto se deve ao fato do f_{ck} ser um grande influenciador do coeficiente de fluência, onde a medida que se aumenta a resistência característica à compressão do concreto, menor será o coeficiente de fluência, acarretando em menos perdas de protensão diferidas, que são as que mais contribuem para as perdas totais de protensão.

A Figura 3 a seguir, ilustra esta diminuição das perdas utilizando os três métodos de cálculo de perdas diferidas.

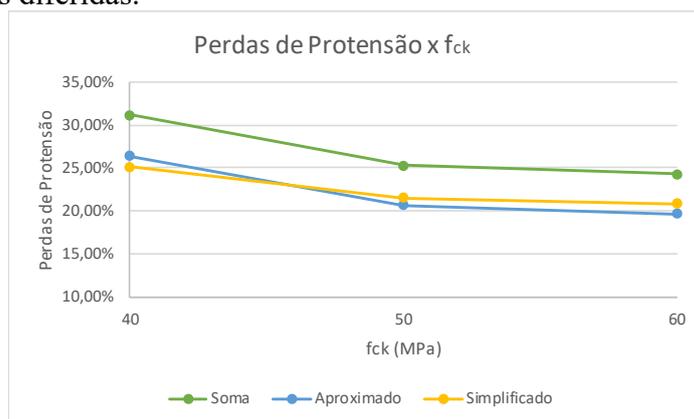


Figura 3 - Perdas de protensão x f_{ck}

Com relação ao f_{ptk} , foram comparadas as vigas V20 e V74 com f_{ck} de 50MPa e demais atributos constantes, variando somente o f_{ptk} em 1900MPa e 2100MPa. Nota-se, a partir da Figura 4, que também ocorre uma diminuição nas perdas de protensão a medida que se aumenta a resistência à tração do aço. Esta diminuição ocorre porque uma resistência

maior à tração do aço de protensão faz com que o valor limite para tensão na armadura de protensão durante o estiramento dos cabos (σ_{pi}) aumente, fazendo com que necessite de menos armadura de protensão, e, logo, menos perdas ocorrerão.

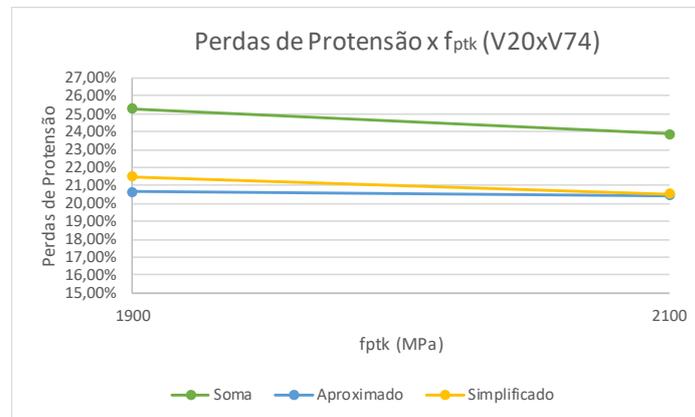


Figura 4 - Perdas de Protensão x f_{ptk} (V20xV74)

Para avaliar o fator r , ou seja, a relação carga variável/carga permanente (r), foram comparadas as vigas V22, V23 e V24, onde o r foi adotado como 0,5, 1,0 e 2,0, e outros fatores permaneceram constantes. Ao analisar as perdas de protensão verifica-se que elas começam a reduzir, mas no fim acontece seu aumento e constata-se uma tendência de seguirem aumentando.

Isto se deve ao fato de que a força de protensão inicial (P_i) diminui à medida que a relação aumenta, pois o momento de cálculo é adotado como uma combinação das ações onde a carga permanente é ponderada pelo coeficiente ψ . Além disso, a combinação adotada também varia conforme a relação de cargas, onde, por exemplo, para o r igual a 0,5 e 1,0 a combinação quase-permanente foi utilizada, já com r igual a 2,0 a combinação frequente foi adotada.

Outro ponto a se destacar é que diante de tudo isso, o número de cordoalhas também vai variando, tornando difícil uma melhor avaliação. Porém, o que se pode notar é que caso esta relação siga subindo as perdas irão aumentar. A Figura 5 demonstra os resultados obtidos:

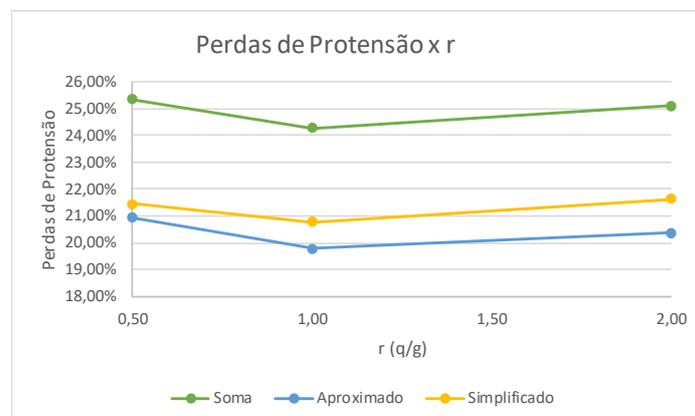


Figura 5 - Perdas de Protensão x r

Já para analisar os efeitos da idade do concreto no ato da protensão (t_0), as vigas V38, V41 e V44 foram avaliadas. A idade foi variada em 7, 14 e 28 dias e os demais atributos mantidos constantes. A Figura 6 demonstra de forma clara que quanto mais velho o concreto no ato da protensão, menores serão as perdas de protensão totais. Isto acontece, porque quanto mais tempo o concreto passa curando, menor será seu coeficiente de fluência, e menor será a deformação por retração, ocasionando uma diminuição significativa das perdas diferidas, que compõem boa parte das perdas de protensão totais.

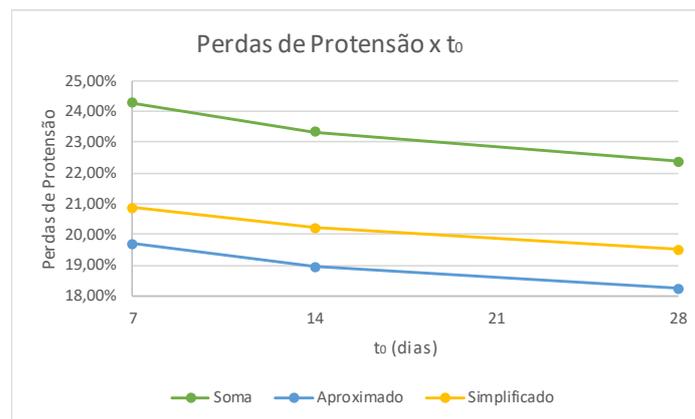


Figura 6 - Perdas de protensão x t_0

Por fim, a respeito do tipo de aço foram comparadas as vigas V07 com a V16 e V25 com a V34, variando somente o tipo de aço, RB ou RN. As primeiras com f_{ck} de 40MPa e as segundas com f_{ck} de 50MPa. Pela Figura 7, verifica-se que o aço de RB é muito melhor no que diz respeito às perdas de protensão do que o aço de RN. As perdas chegam a aumentar aproximadamente 10% utilizando este último. Isto ocorre, pois a relaxação do aço influencia bastante nas perdas diferidas, que, conforme mencionado anteriormente, compõem grande porcentagem dentro das perdas totais.

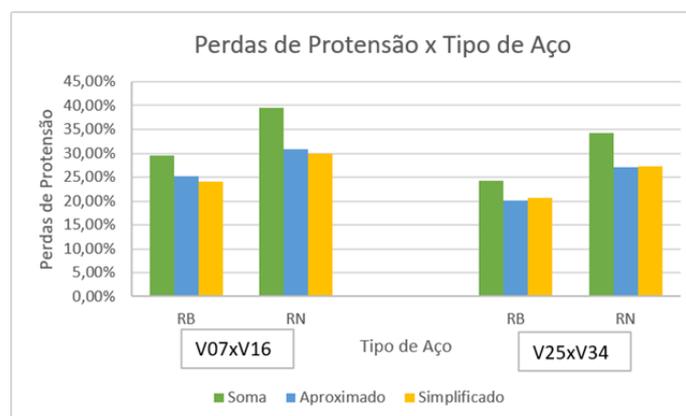


Figura 7 - Perdas de protensão x Tipo de aço

Conclusões

Portanto, após a análise dos diversos fatores componentes do dimensionamento de vigas de concreto protendido pós-tracionadas, pode-se chegar à conclusão de alguns conceitos.

Verificou-se que as perdas de protensão reduzem conforme a resistência característica à compressão do concreto é aumentada. Da mesma forma as perdas diminuem a medida que a resistência à tração do aço de protensão aumenta. Também acarreta num decréscimo nas perdas a utilização de um concreto mais velho no ato da protensão, com um tempo de cura maior.

Porém, ocorreram aumentos das perdas de protensão quando se utiliza o aço de relaxação normal ao invés do aço de relaxação baixa. E também, constatou-se a tendência de aumento das perdas conforme a relação carga variável/carga permanente aumenta de valor.

Vale destacar que para pesquisas futuras seria interessante avaliar estes efeitos nas perdas de protensão em vigas protendidas pré-tracionadas, além de utilizar outras seções transversais para verificar se o comportamento será similar.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6.118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- BASTOS, P.S.S. Concreto Protendido (Notas de aula). Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2015.
- KLEIN, R., 2002. Dimensionamento por computador de vigas simplesmente apoiadas de concreto protendido pós-tracionadas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
- MOURA, M.W., 2004. Estudo sobre o traçado de cabos pós-tracionados em vigas isostáticas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
- PFEIL, W. Concreto Protendido Volume 1. 2a Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988.
- VERÍSSIMO, G. S.; CÉSAR JR, K.M.L. Concreto Protendido – Fundamentos Básicos.. 4a Edição. Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- VERÍSSIMO, G.S.; CÉSAR JR, K.M.L. Concreto Protendido – Perdas de Protensão.. 4a Edição. Universidade Federal de Viçosa, 1998.