ANÁLISE COMPARATIVA DE VIGA PROTENDIDA DE PONTE COM USO DE AÇO CP-190 RB E CP-210 RB

MIGLIORE, Gabriel Moreira (1); PARSEKIAN, Guilherme Aris (2)

(1) Engenheiro Civil, Universidade Federal de São Carlos, gabriel.migliore@hotmail.com; (2) Professor, Universidade Federal de São Carlos, parsekian.ufscar@gmail.com

Resumo: *Recentemente uma nova cordoalha com aço CP-210 RB foi introduzida no mercado brasileiro, sendo importante fornecer parâmetros relevantes para a orientação de projeto e de execução para elementos protendidos com uso dessas cordoalhas. Este artigo apresenta as diferenças do processo de produção e das características dos aços de protensão CP-190, tradicionalmente utilizado, e o novo CP-210. É apresentado um exemplo numérico de dimensionamento de viga isostática protendida, com uso de cordoalhas de CP-190 RB e CP-210 RB, para pontes rodoviárias, classe 450, com tabuleiro de vigas múltiplas pré-moldadas, visando comparar critérios e detalhes típicos de projeto utilizando o aço escolhido. A partir do exemplo numérico para situação de protensão completa, é realizado um estudo de comparação de consumos e custos de serviços para a execução de vigas pré-moldadas protendidas. Deste modo, através da análise dos resultados comparativos, foi possível identificar que a melhor solução econômica e de melhor desempenho estrutural para viga protendida é a protensão com o novo aço CP-210 RB para viga isostática com vão de 25 m.*

Palavras-chave: *Pontes, concreto protendido, aço de protensão.*

Área do Conhecimento: *Tecnologia de processos e sistemas construtivos.*

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do último século a evolução da engenharia estrutural ocorreu principalmente devido ao avanço de três fatores: materiais estruturais, processos de cálculos e de projetos, e métodos e procedimentos construtivos. O desenvolvimento de novos aditivos e adições para o concreto promoveu melhorias de qualidade, durabilidade e aumento da resistência à compressão, que nos dias atuais com facilidade ultrapassam valores de 50 MPa aos 28 dias (CHOLFE, 2013).

Com o avanço industrial das ligas metálicas, principalmente devido às melhorias no processo de trefilação e utilização de elementos mais nobres na composição química do aço, recentemente foi disponibilizado no mercado brasileiro o aço de alta resistência CP-210 RB, com importantes aplicações em elementos de concreto protendido. Do ponto de vista econômico, o aumento do custo unitário proveniente da utilização de concreto e aço de alta resistência é inferior quando comparado ao ganho de resistência e desempenho do elemento estrutural.

Este artigo tem o intuito de apresentar as diferenças do processo de produção e as principais características dos aços de protensão CP-190 RB e CP-210 RB. A partir do estudo de caso apresentado foi possível avaliar os consumos de materiais e custos de serviços para cada aço de protensão adotado. O estudo de caso representativo aborda uma viga isostática pré-moldada com uso de aços CP-190 RB e CP 210-RB, para obra de ponte rodoviária, atendendo as condições de projeto de protensão completa. Elementos estruturais com protensão completa apresentam melhor desempenho estrutural devido a eliminação de fissuras.

2 AÇO DE PROTENSÃO CP-190 E CP-210

A primeira obra em concreto protendido no Brasil foi a ponte do Galeão no Rio de Janeiro em 1948, com fios de aço de 5 mm importados da França. Poucos anos depois, em 1952 a Cia. Siderúrgica Belgo-Mineira, atualmente Belgo Bekaert, iniciou a produção brasileira de fios de 5mm e 7mm de diâmetro. Inicialmente eram produzidos no Brasil os aços com resistência à ruptura de 1.300 MPa. Atualmente os aços para protensão possuem características especiais, contam com composição química ausente de compostos fragilizadores (pureza) que confere ao fio-máquina (aço longo de seção circular resultante da laminação) resistência à ruptura maior que 1.000 MPa. Essa pureza permite que o fio máquina seja trefilado, passando por diversas fieiras reduzindo em até 85% o diâmetro e elevando a tensão de ruptura até a 2.100 MPa (CAUDURO & GARCIA, 2015).

Segundo Buchaim (2007), após o processo de trefilação são formadas as cordoalhas compostas por 3 ou 7 fios. As cordoalhas de 7 fios constituem de 6 fios de mesmo diâmetro nominal, encordados juntos em forma helicoidal, em torno de um fio central reto de diâmetro nominal maior que os fios externos. Posteriormente, para aumento de resistência, as cordoalhas são submetidas a tratamento termomecânico para estabilização, resultando em cordoalhas de relaxação baixa (RB). As cordoalhas de relaxação normal (RN) são obtidas por tratamento térmico seguido de resfriamento lento, o que resulta em alivio de tensões internas. Atualmente as cordoalhas de relaxação normal (RN) estão sendo produzidas no mercado nacional apenas sob encomenda.

O Quadro 1 a seguir apresenta as principais características das cordoalhas de 7 fios de aços de protensão CP-190 e CP-210 com relaxação baixa (RB), conforme ABNT NBR 7483 (2008). Nota-se no Quadro 1, que as cordoalhas de aço de CP-190 RB e CP-210 RB apresentam mesma bitola ou diâmetro nominal. Ambos aços de protensão apresentam módulo de elasticidade de 200GPa e alongamento mínimo de 3,5% após ruptura do aço, atendendo às exigências da ABNT NBR 7483 (2008). Observa-se também no Quadro 1 que o aço de protensão CP-210 RB apresenta resistência à ruptura por tração 10% maior que o aço de protensão CP-190 RB, de acordo com Santos (2016), devido ao processo de metalurgia do aço, pois o aço CP-210 utiliza composição química de elementos mais nobres e de maior pureza quando comparado ao aço CP-190. Ainda de acordo com Santos (2016), em meados de 2010 a Belgo Bekaert inicia a produção brasileira de aço CP-210 RB na unidade fabril de Juiz de Fora - MG, com início de vendas sob encomenda para o mercado nacional em 2013 e a partir de 2016 o produto é disponibilizado em estoque.

Quadro 1 – Características das cordoalhas de 7 fios com relaxação baixa (RB)

Categoria do aço de protensão	Tensão de resistência à ruptura (kN/cm²)	Diâmetro nominal da cordoalha (mm)	Área nominal da seção de aço da cordoalha (cm²)	Massa nominal (kg/m)
CP-190 RB	190	9,5	0,562	0,441
		12,7	1,009	0,792
CP-210 RB	210	15,2	1,434	1,126

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7483 (2008)

3 ESTUDO DE CASO

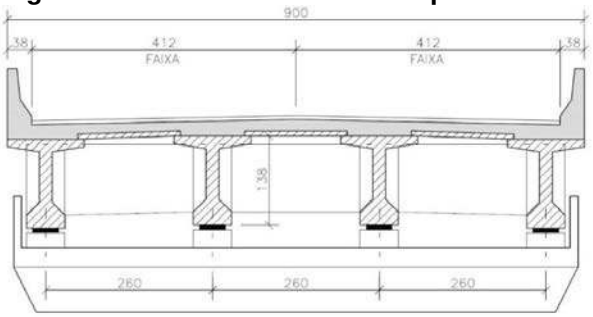
Este estudo de caso trata de um viaduto rodoviário real projetado pela empresa Migliore Pastore Engenharia com uso de CP-210 RB e adaptado para uso de cordoalhas de CP-190 RB. A Figura 1 ilustra a vista parcial de execução das longarinas do viaduto estudadas neste artigo. O tabuleiro do viaduto em estudo tem largura total de 9m e é composto por vigas múltiplas pré-moldadas isostáticas, conforme corte transversal da superestrutura apresentado na Figura 2. A longarina isostática em estudo possui vão efetivo de 25 m, seção composta por pré-viga de altura de 138 cm e mesa moldada no local com espessura média de 22 cm. Foi considerado concreto classe C45 para os elementos pré-moldados e classe C35 para os de concreto moldados no local.

Figura 1 – Vista das longarinas do viaduto rodoviário



Fonte: Autor (2017)

Figura 2 – Corte transversal da superestrutura



Fonte: Adaptado de Migliore Pastore Engenharia (2016)

As ações variáveis verticais atuantes sobre o viaduto rodoviário foram consideradas de acordo com a ABNT NBR 7188 (2013) e ABNT NBR 7187 (2003), para valores de carga móvel rodoviária padrão, ponte de classe 450. Os esforços nos elementos estruturais foram obtidos com auxílio de programa comercial de análise estrutural STRAP, da ATIR (2016). O modelo estrutural é formado por elementos de placa, que representam as lajes do tabuleiro, e por elementos de barra, que representam as quatro longarinas e duas transversinas de apoio. A distribuição transversal de cargas na ponte, após a solidarização das lajes com as vigas, é realizada automaticamente pelo programa considerando a rigidez das longarinas. O Quadro 2 apresenta o resumo de esforços característicos de flexão simples para a longarina isostática com maior solicitação, onde $Mg0$ é o momento fletor devido ao peso próprio da pré-viga da longarina em estudo, $Mg1$ o momento fletor devido as demais ações permanentes e ϕ Mq é o momento fletor devido as ações variáveis verticais ponderadas pelo coeficiente de impacto, definido na ABNT NBR 7188 (2013). Para avaliar as solicitações na longarina, as seções de cálculo foram fixadas em décimos de vão, onde a Seção 0 e 10 representam as seções do apoio e a seção 5 representa a seção do meio de vão.

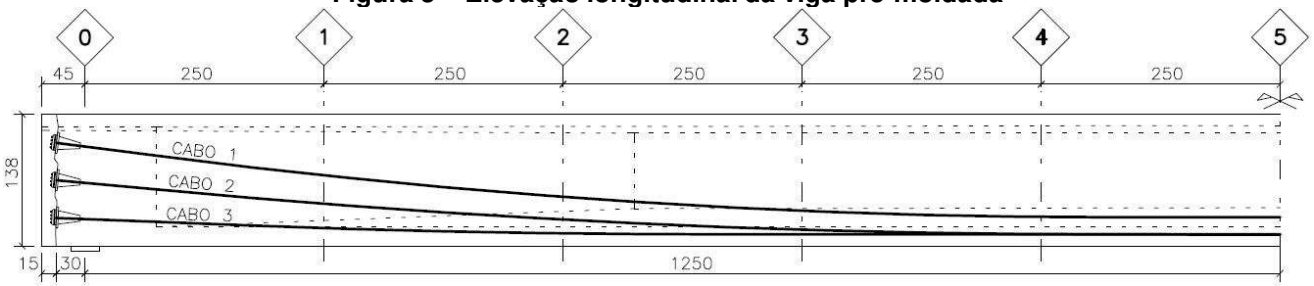
Quadro 2 – Resumo de solicitações de flexão simples

Seção	$Mg0$ (kN.m)	$Mg1$ (kN.m)	ϕ Mq (kN.m)
1	391	984	397
3	912	2.298	926
5	1.086	2.735	1.102

Fonte: Adaptado de Migliore Pastore Engenharia (2016)

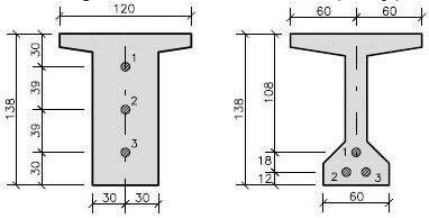
Para a longarina em estudo foi utilizado o sistema de pós-tração com aderência posterior, executado em apenas uma etapa e com ancoragem ativa em ambas extremidades da viga. A Figura 3 ilustra a elevação longitudinal da viga pré-moldada de comprimento total de 26,9 m e apresenta o traçado longitudinal dos três cabos de protensão, usualmente chamado de cablagem. A posição dos cabos e a geometria das seções transversais 0 e 5 são representadas pela Figura 4. As principais características geométricas da seção transversal 5 são apresentadas no Quadro 3, para a seção simples inicial e seção composta final, onde h é a altura total da viga, y1 é a distância da fibra inferior em relação ao centro geométrico, Ac é a área da seção transversal bruta de concreto, Ic é o momento de inércia da seção bruta de concreto. Para comparação de dimensionamento de viga protendida, são apresentados três exemplos numéricos com uso de aço CP-190 RB e CP-210 RB. Para efeito de análise será fixada a força de protensão inicial em 2.100 kN por cabo para os exemplos 1 e 2, de modo a atender as condições de projeto no estado limite de serviço (ELS) de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014). No exemplo 3 o número de cabos de protensão será reduzido e a força de protensão inicial será de 2.850 kN por cabo.

Figura 3 – Elevação longitudinal da viga pré-moldada



Fonte: Adaptado de Migliore Pastore Engenharia (2016)

Figura 4 – Seções transversais 0 (esq.) e 5 (dir.)



Fonte: Adaptado de Migliore Pastore Engenharia (2016)

Quadro 3 – Características geométricas da seção transversal 5

Seção	Inicial	Final
h (cm)	138,0	160,0
y1 (cm)	75,0	111,4
Ac (cm²)	5.560	11.280
Ic (cm^4)	13.678.540	28.898.700

Fonte: Adaptado de Migliore Pastore Engenharia (2016)

3.1 Viga protendida com 3 cabos de aço CP-190 RB

O arranjo adotado de armadura ativa para a viga protendida em estudo é composto por 3 cabos de 15ϕ12,7mm de aço CP-190 RB e as principais características da armadura ativa são apresentadas no Quadro 4, onde f_{ptk} é tensão de resistência à ruptura por tração da armadura ativa, σ_{Plim} é a tensão inicial limite para armadura ativa, σ_{Pini} é a tensão inicial adotada para armadura ativa, Ap é a área da seção transversal da armadura ativa, N_{Pini} é a força de protensão inicial sem perdas, N_{P0} é a força de protensão no tempo zero após perdas imediatas e N_{Pinf} é a força de protensão no tempo infinito após perdas imediatas e progressivas. Para o arranjo adotado, a perda relativa imediata de força de protensão no cabo resultante é de 7,8%, perda relativa progressiva de 17,8% e perda total relativa de 24,2%.

Quadro 4 – Características da armadura ativa (3 cabos de aço CP-190 RB)

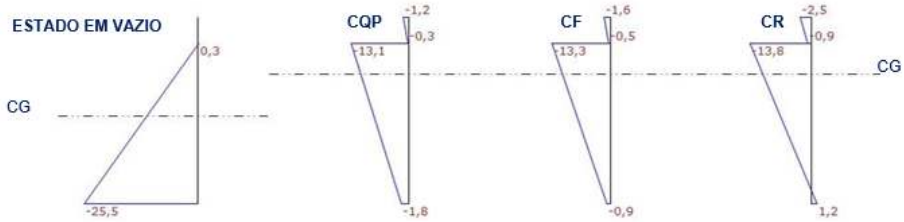
Aço	f_{ptk} (MPa)	σ_{Plim} (kN/cm²)	σ_{Pini} (kN/cm²)	Ap (cm²/cabo)	N_{Pini} (kN/cabo)	N_{P0} (kN/cabo)	N_{Pinf} (kN/cabo)
CP-190 RB	1.900	140,60	138,61	15,14	2.100	1.937	1.592

Fonte: Autor (2017)

A viga em estudo é dimensionada para a situação de protensão completa, verificando as tensões em conformidade com a ABNT NBR 6118 (2014) para as seguintes condições: a) estado-limite de compressão excessiva (ELS-CE) para a situação da peça no estado em vazio, onde atua somente o peso próprio do elemento, respeitando o limite de $\sigma_c=0,7f_{ckj}$; b) estado-limite de descompressão (ELS-D) para a combinação frequente de ações (CF), respeitando o limite de $\sigma_t=0$; e c) estado-limite de formação de fissuras (ELS-F) para a combinação rara de ações (CR), respeitando o limite de $\sigma_t=1,2f_{ctk,inf}$, onde σ_c é a tensão de compressão no concreto com valores de sinal negativo, σ_t é a tensão de tração com valores de sinal positivo, f_{ckj} é a resistência característica do concreto à compressão aos j dias e $f_{ctk,inf}$ é a resistência característica inferior do concreto à tração direta. Deste modo as tensões limite são: a) σ_c = -31,5 MPa para ELS-CE; b) σ_t = 0 MPa para ELS-D; e c) σ_t = 3,2 MPa para ELS-F.

A Figura 5 ilustra as tensões normais na fibra superior e inferior na seção 5 com seção simples para a situação da peça em estado de vazio e seção composta para as combinações de ações CQP, CF e CR. As ações variáveis foram ponderadas de acordo com a ABNT NBR 8681 (2003) considerando os coeficientes de redução de ações ψ_2=0,3 e ψ_2=0,5 para CQP e CF respectivamente. Para a situação estado em vazio foi considerada que a força de protensão é aplicada na idade j de 28 dias e com intensidade de 1,10 N_{P0}. A partir da Figura 5 é possível concluir que a situação de protensão completa foi atendida para o arranjo adotado, pois as tensões normais na seção 5 não excedem os valores de tensões limite. As tensões normais máximas na seção 5 são: a) σ_c = -25,5 MPa para ELS-CE; b) σ_c = -0,9 MPa para ELS-D; e c) σ_t = 1,2 MPa para ELS-F.

Figura 5 – Tensões normais (MPa) na seção 5 (3 cabos de aço CP-190 RB)



Fonte: Autor (2017)

3.2 Viga protendida com 3 cabos de aço CP-210 RB

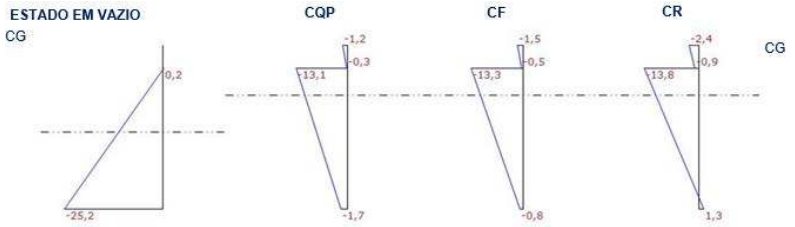
O arranjo adotado de armadura ativa para a viga em estudo é composto por 3 cabos de 10ϕ15,2mm de aço CP-210 RB e as principais características da armadura ativa são apresentadas no Quadro 5. Para o arranjo adotado, a perda relativa imediata de força de protensão no cabo resultante é de 8,8%, perda relativa progressiva de 17,1% e perda total relativa de 24,4%. A Figura 6 ilustra as tensões normais na fibra superior e inferior na seção 5 e a partir da mesma é possível concluir que a situação de protensão completa foi atendida para o arranjo adotado, pois as tensões normais não excedem os valores de tensões limite. As tensões normais máximas na seção 5 são: a) σc = -25,2 MPa para ELS-CE; b) σc = -0,8 MPa para ELS-D; e c) σt = 1,3 MPa para ELS-F.

Quadro 5 – Características da armadura ativa (3 cabos de aço CP-210 RB)

Aço	f_{ptk} (MPa)	σ_{Plim} (kN/cm²)	σ_{Pini} (kN/cm²)	A_p (cm²/cabo)	N_{Pini} (kN/cabo)	N_{P0} (kN/cabo)	N_{Pinf} (kN/cabo)
CP-210 RB	2.100	155,40	146,85	14,30	2.100	1.915	1.588

Fonte: Autor (2017)

Figura 6 – Tensões normais (MPa) na seção 5 (3 cabos de aço CP-210 RB)



Fonte: Autor (2017)

3.3 Viga protendida com 2 cabos de aço CP-210 RB

O arranjo adotado de armadura ativa para a viga em estudo é composto por 2 cabos de 13ϕ15,2mm de aço CP-210 RB e as principais características da armadura ativa são apresentadas no Quadro 6Quadro 5. Para o arranjo adotado, a perda relativa imediata de força de protensão no cabo resultante é de 7,9%, perda relativa progressiva de 15,6% e perda total relativa de 22,2%.

Quadro 6 – Características da armadura ativa (2 cabos de aço CP-210 RB)

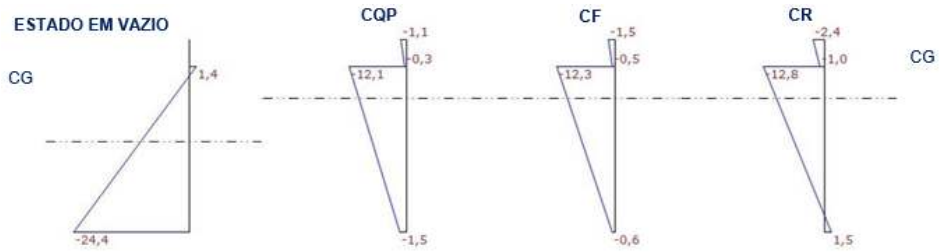
Aço	f_{ptk} (MPa)	σ_{Plim} (kN/cm²)	σ_{Pini} (kN/cm²)	A_p (cm²/cabo)	N_{Pini} (kN/cabo)	N_{P0} (kN/cabo)	N_{Pinf} (kN/cabo)
CP-210 RB	2.100	155,40	153,31	18,59	2.850	2.625	2.217

Fonte: Autor (2017)

A Figura 7 ilustra as tensões normais na fibra superior e inferior na seção 5 e a partir da mesma é possível concluir que a situação de protensão completa foi atendida para o arranjo adotado, pois as tensões

normais não excedem os valores de tensões limite. As tensões normais máximas na seção 5 são: a) σc = -24,4 MPa para ELS- CE; b) σc = -0,6 MPa para ELS-D; e c) σt = 1,5 MPa para ELS-F.

Figura 7 – Tensões normais (MPa) na seção 5 (2 cabos de aço CP-210 RB)



Fonte: Autor (2017)

4 CUSTOS DE PRODUÇÃO

A comparação de custos para produção de viga protendida com aço CP-190 RB e CP-210 RB foi realizada através de Tabela de Preços Unitários, TPU, conforme Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (2017), DER-SP, relativa a março de 2017 com valores não desonerados para obras de arte especiais. Os custos unitários contemplam os valores relativos a mão de obra, encargos sociais (129,28% para horista e
78,30% para mensalista), BDI (35%) e todos os equipamentos necessários à perfeita execução dos serviços.

Conforme especificação técnica ET-DE-C00/001 do DER-SP, para o custo de concreto classe C45 estão inclusos: fornecimento, lançamento, adensamento, acabamento, perdas e cura do concreto. De acordo com ET-DE-C00/002 do DER-SP, para o custo de forma metálica especial para vigas estão inclusos: fornecimento, montagem, escoramento lateral, travamentos, desmontagem, perdas e reaproveitamento. Segundo ET-DE-C00/004 do DER-SP, para o custo de armadura passiva de aço CA-50 estão inclusos: fornecimento, corte, dobra, perdas, arame recozido e montagem. Ainda de acordo com a mesma especificação técnica, para o custo de armadura ativa estão inclusos: fornecimento, preparação dos cabos, bainha metálica, enfiação, purgadores, montagem, fixação, protensão, injeção com calda de cimento, corte, perdas e acabamento. O custo de aparelho de ancoragem ativa inclui: fornecimento, montagem, bloco, placa, funil e cunhas.

Os quadros seguintes apresentam os custos de produção de viga protendida com uso de CP-190 RB e CP-210 RB. O consumo de armadura passiva, aço CA-50, inclui o consumo de armadura de flexão, pele, cisalhamento e torção, fretagem de ancoragem ativa e apoio, consideradas conforme projeto realizado pela empresa Migliore Pastore Engenharia para o viaduto rodoviário em estudo. A partir de consulta a fornecedores de cordoalhas de aço foi possível identificar o preço do material, sendo 4,57 R$/kg para cordoalhas CP-190 RB e 4,74 R$/kg para cordoalhas CP-210 RB, a diferença de preço é de 0,17 R$/kg, menor que 4%. A TUP do DER-SP aparentemente não distingue o custo de armadura ativa, em virtude do custo unitário já contemplar outros serviços além da própria cordoalha de aço. Neste artigo o custo unitário considerado para o serviço aço CP-210 foi obtido através da diferença de preço das cordoalhas, CP-190 RB e CP-210 RB, com acréscimo no custo unitário para serviço CP-210 a partir do serviço CP-190 da TUP do DER-SP, resultando em valor de 22,77 R$/kg para CP-210, contra 22,60 R$/kg do CP-190. A diferença de custo de material é, portanto, de menos de 1%.

Pode-se observar no Quadro 7 que o custo total de produção para uma viga com 3 cabos de aço CP-190 RB é de R$78.395,77, obtendo os seguintes índices: 4.627,85 R$/m³ de concreto e 1.345,27 R$/m² de tabuleiro. Pode ser observado no Quadro 8 que o custo total de produção para uma viga com 3 cabos de aço CP-210 RB é de R$77.407,01, obtendo os seguintes índices: 4.569,48 R$/m³ de concreto e 1.328,31 R$/m² de tabuleiro. Pode ser observado no Quadro 9 que o custo total de produção para uma viga com 2 cabos de aço CP-210 RB é de R$73.979,31, obtendo os seguintes índices: 4.367,14 R$/m³ de concreto e 1.269,49 R$/m² de tabuleiro.

A partir da análise dos Quadros 7 e 8 verifica-se que o consumo de aço CP-210 é menor que o consumo de aço CP-190, porém o custo unitário do aço CP-210 é maior que o aço CP-190, resultando no custo final de produção de viga protendida com 3 cabos de aço CP-210 menor que viga protendida com 3 cabos de aço CP-190, em torno de 1%. Quando comparado os Quadros 7 e 9, observa-se que a diferença no custo final de produção foi maior, em torno de 6%, para viga com 2 cabos de aço CP-210 e viga com 3 cabos de aço de CP-

190. O custo unitário do serviço de aparelho de ancoragem ativa é o mesmo para uso com 3 cabos de aço CP-190 e 3 cabos de aço CP-210, pois a força de protensão inicial considerada é a mesma para ambos os cabos.

Quadro 7 – Custo de produção de viga protendida com 3 cabos de aço CP-190 RB

Descrição do serviço	Unid.	Quant.	Custo unit. (R$/unid.)	Custo total (R$)	Percentual
Concreto C45	m³	16,94	618,19	10.472,14	13,4%
Forma metálica	m²	109,83	78,34	8.604,08	11,0%
Aço CA-50	kg	2.737,80	9,14	25.023,49	31,9%
Aço CP-190	kg	970,95	22,60	21.943,52	28,0%
Aparelho de ancoragem ativa	unid.	6,00	2.058,76	12.352,53	15,8%
Total				**78.395,77**	**100,0%**

Fonte: Autor (2017)

Quadro 8 – Custo de produção de viga protendida com 3 cabos de aço CP-210 RB

Descrição do serviço	Unid.	Quant.	Custo unit. (R$/unid.)	Custo total (R$)	Percentual
Concreto C45	m³	16,94	618,19	10.472,14	13,5%
Forma metálica	m²	109,83	78,34	8.604,08	11,1%
Aço CA-50	kg	2.737,80	9,14	25.023,49	32,3%
Aço CP-210	kg	920,28	22,77	20.954,77	27,1%
Aparelho de ancoragem ativa	unid.	6,00	2.058,76	12.352,53	16,0%
Total				**77.407,01**	**100,0%**

Fonte: Autor (2017)

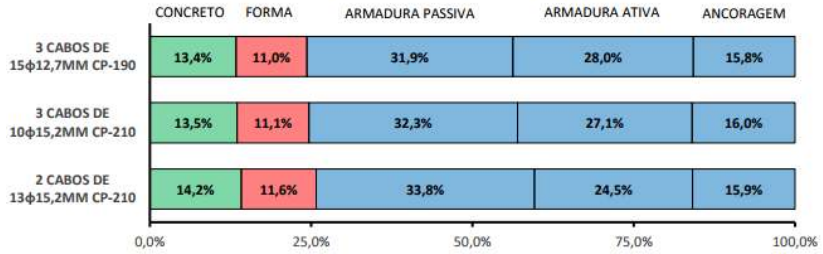
Quadro 9 – Custo de produção de viga protendida com 2 cabos de aço CP-210 RB

Descrição do serviço	Unid.	Quant.	Custo unit. (R$/unid.)	Custo total (R$)	Percentual
Concreto C45	m³	16,94	618,19	10.472,14	14,2%
Forma metálica	m²	109,83	78,34	8.604,08	11,6%
Aço CA-50	kg	2.737,80	9,14	25.023,49	33,8%
Aço CP-210	kg	796,21	22,77	18.129,59	24,5%
Aparelho de ancoragem ativa	unid.	4,00	2.937,50	11.750,00	15,9%
Total				**73.979,31**	**100,0%**

Fonte: Autor (2017)

A Figura 8 a seguir ilustra os percentuais de custos de cada serviço para a produção de viga protendida com uso de 3 cabos de aço CP-190, 3 cabos de aço de CP-210 e 2 cabos de aço de CP-210. A partir da análise da Figura 8 cabe destacar que a armadura da viga isostática, composta por armadura ativa, passiva e ancoragem ativa, representa em torno de 75% do custo final do produto e que o custo do serviço de ancoragem ativa é superior ao custo do serviço de concreto para a viga pré-moldada de comprimento total de 26,9 m.

Figura 8 – Percentual dos custos de serviço para produção de viga protendida



Fonte: Autor (2017)

5 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou algumas das diferenças do processo de produção e características dos aços de protensão CP-190, tradicionalmente utilizado, e o novo aço CP-210. A partir dos exemplos numéricos apresentados de uma ponte rodoviária, foi possível verificar alguns dos parâmetros de projeto para o dimensionamento de viga isostática pré-moldada com uso de cordoalhas de protensão CP-190 RB e CP-210 RBA viga protendida deste artigo foi verificada para a situação de protensão completa, para as condições ELS-CE, ELS-D e ELS-F, onde foram constatadas tensões normais de valores praticamente iguais, para as tensões de compressão e tração, nos três exemplos apresentados com uso de aço CP-190 RB e CP-210 RB.

A partir do comparativo de custos de mercado apresentado, observou-se que o custo da cordoalha nua de CP-210 RB é maior que a de CP-190 RB em cerca de 4%, porém o consumo de armadura ativa de CP-210 utilizado para produção de vigas é menor quando comparado ao CP-190. O custo total de produção de viga com uso de aço de CP-210 RB é menor que a de CP-190 RB, quando utilizados 3 cabos de CP-210 RB o custo é menor cerca de apenas 1% e quando utilizados 2 cabos de CP-210 RB o custo é menor cerca de 6%.

Para a viga protendida em estudo observou-se que o custo dos aparelhos de ancoragem ativa representa cerca de 16% do custo total da viga pré-moldada de comprimento total de 26,9 m, sendo este percentual maior que o custo do serviço de concreto. Para eventual viga de maior comprimento que a do estudo apresentado, este percentual irá diminuir e para eventual viga menor o percentual deverá ser mais elevado, uma vez que a quantidade de ancoragens é função da quantidade de cabos de protensão.

Por fim, é recomendado utilizar cordoalhas de aço de CP-210 RB, pois para uma mesma força inicial de protensão é necessária uma menor área da seção transversal da armadura ativa e consequentemente menor peso de aço, quando comparado ao aço de protensão CP-190 RB. Com a utilização da cordoalha recém introduzida no mercado é possível reduzir a quantidade de cabos de protensão, quando comparado ao uso com a cordoalha tradicional para vigas isostáticas com força de protensão equivalente, resultando em redução de custo de produção.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR-6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR-7187: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR-7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR-7483: Cordoalhas de aço para concreto protendido - Requisitos. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR-8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ATIR. STRAP – Structural Analysis Program, STRAP. Versão 2016. Microsoft Windows. Israel, 2016. BUCHAIM, R. Concreto protendido: tração axial, flexão simples e força cortante. Londrina: EDUEL, 2007. 256p.

CAUDURO, E. L.; GARCIA, D. L. Evolução dos aços para protensão no Brasil. Concreto & Construções, São Paulo, n. 78, p. 69-71, abr./jun. 2015.

CHOLFE, L. Concreto protendido: teoria e prática. São Paulo: Pini, 2013. 337p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÀO PAULO. ET-DE-C00/001 – Especificação técnica de concreto estrutural, ET-DE-C00/001. Disponível em <http://www.der.sp.gov.br/ Website/Acessos/ Documentos/Tecnicas.aspx>, acesso em 21 de maio de 2017.

. ET-DE-C00/002 – Especificação técnica de formas para concreto, ET-DE-C00/002. Disponível em <http://www.der.sp.gov.br/Website/Acessos/ Documentos/Tecnicas.aspx>, acesso em 21 de maio de 2017.

. ET-DE-C00/004 – Especificação técnica de armaduras para concreto estrutural, ET-DE-C00/004. Disponível em <http://www.der.sp.gov.br/Website/Acessos/ Documentos/Tecnicas.aspx>, acesso em 21 de maio de 2017.

. TPU – Tabela de preços unitários, TPU. Disponível em <http://www.der.sp.gov.br/Website/Acessos/ Documentos/PrecosUnitarios.aspx>, acesso em 21 de maio de 2017.

MIGLIORE PASTORE ENGENHARIA. MC1783 – Memória de cálculo de viaduto rodoviário, MC1783. 2016

SANTOS, W. R. Processo produtivo do aço para concreto protendido. III SELAP: Seminário latino-americano de protensão, Guarulhos, 2016.