

Estudo sobre a Eficiência e Aplicação do Aço GG 70 (Gerdau) em Obras de Arte Especiais – Um estudo de caso

Amacin Rodrigues Moreira¹
Patricia Fontana²
Bianca Marques Meo³

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) / Nortéa Soluções em Engenharia / Engenharia Civil / amacinrm@utfpr.edu.br

² Faculdade IDD / Nortéa Soluções em Engenharia / Engenharia Civil / patriciafontana@gmail.com

³ Gerdau Aços Longos / Engenharia Civil / bianca.meo@gerdau.com.br

Resumo

No Brasil o modal rodoviário conta com 1.720.909,0 km de rodovias, segundo dados da Pesquisa CNT de Rodovias (2021). Por outro lado, conforme dados da ANTF, o setor ferroviário de carga apresentou um crescimento de 3,6% no ano de 2021, em comparação a 2020, demonstrando a importância desse modal. Sobre obras de infraestrutura é possível citar, ainda, o crescimento da demanda por obras de barragens e portos. As obras citadas consistem em construções compostas por elementos de grande porte, em decorrência dos elevados carregamentos e consequentes esforços de grande intensidade, executados majoritariamente em concreto armado, e que apresentam seções com grande consumo de concreto e elevada quantidade de armaduras. Em virtude dessas características, a utilização de materiais mais resistentes tem se mostrado promissora na redução de consumo dos materiais, como no caso do emprego de maiores resistências do concreto como previsto pela NBR 6118:2014 e agora com a produção de aços com elevada resistência mecânica. Essa redução de matéria prima empregada (desmaterialização) tem também potencial para diminuição significativa de emissões de gases de efeito estufa. Nesse sentido, a Gerdau iniciou a produção do GG 70, que consiste em um aço para concreto armado com limite de escoamento de 700 MPa. No presente artigo são apresentados aspectos de consumo desse aço quando da aplicação em longarinas e pilares de uma obra de arte especial composta por vigas pré-moldadas, comparando-se os resultados com a hipótese de uso do aço CA-50. Durante o estudo da OAE foi avaliado o comportamento do aço GG 70 no dimensionamento no estado limite último e nas verificações previstas na normalização para os estados limites de serviço. Os resultados demonstraram que as seções apresentam melhorias no desempenho mecânico, redução da quantidade de aço e otimização do detalhamento, o que pode contribuir para o setor através da implantação de processos construtivos mais ágeis.

Palavras-chave

Concreto armado; aço de elevada resistência; obras de arte especiais; infraestrutura; desmaterialização

1. Introdução

O concreto armado trata-se do material composto de maior utilização no Brasil e no mundo, por apresentar uma excelente resistência mecânica obtida da combinação do concreto de cimento

portland com o aço, além de apresentar durabilidade elevada quando do emprego de técnicas corretas de projeto e execução, o que contribui para o uso desse material em empreendimentos de grande porte e em obras de infraestrutura, como no caso de pontes e viadutos.

Algumas das características dessas obras são a grande intensidade dos esforços atuantes na estrutura e a presença de grandes vãos a serem vencidos, o que exige a presença de peças de concreto de elevadas dimensões e grande quantidade de armaduras, mesmo com a evolução nas últimas décadas da tecnologia do concreto, o que possibilitou o uso de elevadas resistências mecânicas nesse material, tendo-se hoje a aplicação de concretos dos grupos I e II da ABNT NBR 8953:2015, até a classe C90, conforme NBR 6118:2014 (ABNT, 2014). Na questão do aço, as categorias existentes atualmente estão em uso desde a década de 60, fornecendo para as seções resistentes elevada densidade de armaduras, a depender da intensidade das solicitações existentes nos elementos.

Do ponto de vista de resistência mecânica, a categoria utilizada para as armaduras principais, CA-50, tem limitado a capacidade dos elementos estruturais. Por outro lado, a grande quantidade de barras obtidas no dimensionamento dificulta as condições de execução, onde o detalhamento necessita de grande atenção aos espaçamentos e a disposição para evitar a segregação do concreto, além disso, aumentando as dificuldades para a equipe de execução, bem como, afetando os prazos de produção.

Considerando esse contexto e a demanda do setor da construção civil por materiais estruturais com maior eficiência, a Gerdau Aços Longos iniciou a produção do aço GG 70, um aço para concreto armado com limite de escoamento de 700 MPa, o qual corresponderia a uma classe CA-70.

A proposta de uso do aço GG 70 em estruturas de infraestrutura visa a otimização no uso de armaduras, a otimização das seções de concreto e a melhoria do processo construtivo.

Assim, este trabalho apresenta os resultados do estudo sobre o potencial de aplicação do aço GG70 nas estruturas das obras de arte especiais, demonstrando os resultados obtidos quando da aplicação do aço nas longarinas e pilares de um estudo de caso, a fim de quantificar e qualificar as vantagens do emprego deste aço, observando todos os critérios de segurança e desempenho em serviço.

2. O aço GG 70

Para análise das propriedades do aço GG 70 foram realizados ensaios de tração em vergalhões com as bitolas de 16 mm, 20 mm e 25 mm e um ensaio da composição química do material para avaliação do carbono equivalente. Ainda estão em desenvolvimento outros ensaios para análise do comportamento do material, como o ensaio de fadiga, segundo a NBR 7478:2021, o ensaio do coeficiente de conformação superficial, segundo as orientações apresentadas pela NBR 7477:1982, e testes de tração em amostras soldadas para confirmar o comportamento quanto à soldabilidade.

A fim de atender os critérios apresentados na NBR 7480:2022, a produção do aço GG 70 segue as recomendações aplicáveis ao CA-50, sendo fornecido em barras retas com comprimento de 12 metros, as quais possuem nervuras transversais oblíquas e duas nervuras longitudinais, contínuas e diametralmente opostas. Ainda, para garantir o uso adequado do material, as barras são dotadas de uma marcação com a indicação da categoria do material, marca e diâmetro nominal.

Os ensaios de tração foram realizados seguindo a recomendação da NBR 7480:2022, Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos, onde é informado que “o ensaio de tração deve ser realizado de acordo com a ABNT NBR ISO 6892”, sendo apresentados na Figura 1 os resultados disponibilizados nos Relatórios de Ensaio emitidos pela empresa Tork Controle Tecnológico de Materiais Ltda, onde podem ser consultados os valores dos limites de escoamento e resistência, bem como, os alongamentos obtidos.

CP	Ø Indicado mm	Peso g	Comprimento mm	g = Peso Compr. kg/m	Ø Calculado mm	Secção Calculada mm ²	Limite de Escoamento		Limite de Resistência		Relação Elástica (LR/LE)	Módulo Elasti- cidade GPa	Alongamento		
							kgf	MPa	kgf	MPa			Lo (mm)	%	L (mm)
1	16	798,5	501,000	1,594	16,078	203,03	15.557	766	17.850	879	1,147	201,1	160	13,5	181,75
2	16	799,7	502,000	1,593	16,074	202,93	15.535	766	17.705	872	1,138	216,5	160	14,0	182,63
3	16	794,6	499,000	1,592	16,071	202,85	15.652	772	17.855	880	1,139	201,0	160	13,0	180,42
Especificado ABNT NBR 7480				1,499 - 1,657	---	---	---	≥ 500	---	---	≥ 1,08	---	---	≥ 8	---

CP	Ø Indicado mm	Peso g	Comprimento mm	g = Peso Compr. kg/m	Ø Calculado mm	Secção Calculada mm ²	Limite de Escoamento		Limite de Resistência		Relação Elástica (LR/LE)	Módulo Elasti- cidade GPa	Alongamento		
							kgf	MPa	kgf	MPa			Lo (mm)	%	L (mm)
1	20,0	1.231,7	499	2,468	20,009	314,44	24.190	769	27.390	871	1,132	200,7	200	14,0	227,68
2	20,0	1.242,7	501	2,480	20,058	315,98	23.800	753	28.440	900	1,195	202,1	200	14,5	228,82
3	20,0	1.224,7	493	2,484	20,073	316,46	23.985	758	28.010	885	1,167	201,1	200	13,0	226,32
Especificado ABNT NBR 7480				2,343 - 2,589	---	---	---	≥ 500	---	---	≥ 1,08	---	---	≥ 8	---

CP	Ø Indicado mm	Peso g	Comprimento mm	g = Peso Compr. kg/m	Ø Calculado mm	Secção Calculada mm ²	Limite de Escoamento		Limite de Resistência		Relação Elástica (LR/LE)	Módulo Elasti- cidade GPa	Alongamento		
							kgf	MPa	kgf	MPa			Lo (mm)	%	L (mm)
1	25,0	1.935,5	501	3,863	25,032	492,14	36.310	738	42.190	857	1,161	207,3	250	11,5	278,36
2	25,0	1.929,1	500	3,858	25,016	491,49	36.400	741	42.070	856	1,155	207,2	250	12,0	280,06
3	25,0	1.935,5	501	3,863	25,032	492,14	36.340	738	42.110	856	1,159	204,5	250	12,0	279,39
Especificado ABNT NBR 7480				3,699 - 4,007	---	---	---	≥ 500	---	---	≥ 1,08	---	---	≥ 8	---

Figura 1 – Resultados dos ensaios de tração para os aços GG-70 de bitola 16mm, 20 mm e 25 mm, respectivamente.

Com relação à soldabilidade do material, os ensaios de composição química indicaram carbono equivalente médio de 0,47%, valor esse inferior ao máximo recomendado de 0,55%, que consiste no valor limite para o qual o aço pode ser considerado soldável.

3. Metodologia

Para avaliação da aplicação do aço GG 70 em obras de arte especiais foi escolhida uma obra para a qual foram realizados os estudos das vigas longarinas e dos pilares, que consistem nos elementos que apresentam as maiores solicitações da estrutura, como estudo de caso.

Selecionou-se para esse estudo um Viaduto em viga pré-moldadas com sistema de pré-lajes tendo em vista ser o sistema mais empregado atualmente para obras de pequenos e médios vãos. A obra em estudo possui comprimento total de 54 metros divididos em dois vãos iguais de 27 metros e largura total de 19,72 metros.

A seção do Viaduto é composta por sete vigas pré-moldadas com altura de 1,75 metros, que suportam pré-lajes de 7 cm de espessura e complemento da laje com 13 cm, perfazendo uma altura total de 1,95 metros.

As vigas pré-moldadas se apoiam em aparelhos de apoio de neoprene fretado que, por sua vez, se apoiam em vigas travessas que em conjunto com os pilares formam pórticos transversais. Nas extremidades a viga incorpora a cortina, as alas laterais e o apoio para a laje de transição. Para cada viga de apoio estão previstos 4 pilares com diâmetro de 100 cm e que se estendem até a infra-estrutura, onde definem-se as bases alargadas, estas com diâmetro de 240 cm para as fundações de extremidade e com diâmetro de 280 cm para as fundações dos pilares centrais, que estarão apoiadas a uma profundidade aproximada de 3 metros.

Na sequência são apresentados os desenhos de seção transversal e longitudinal da obra.

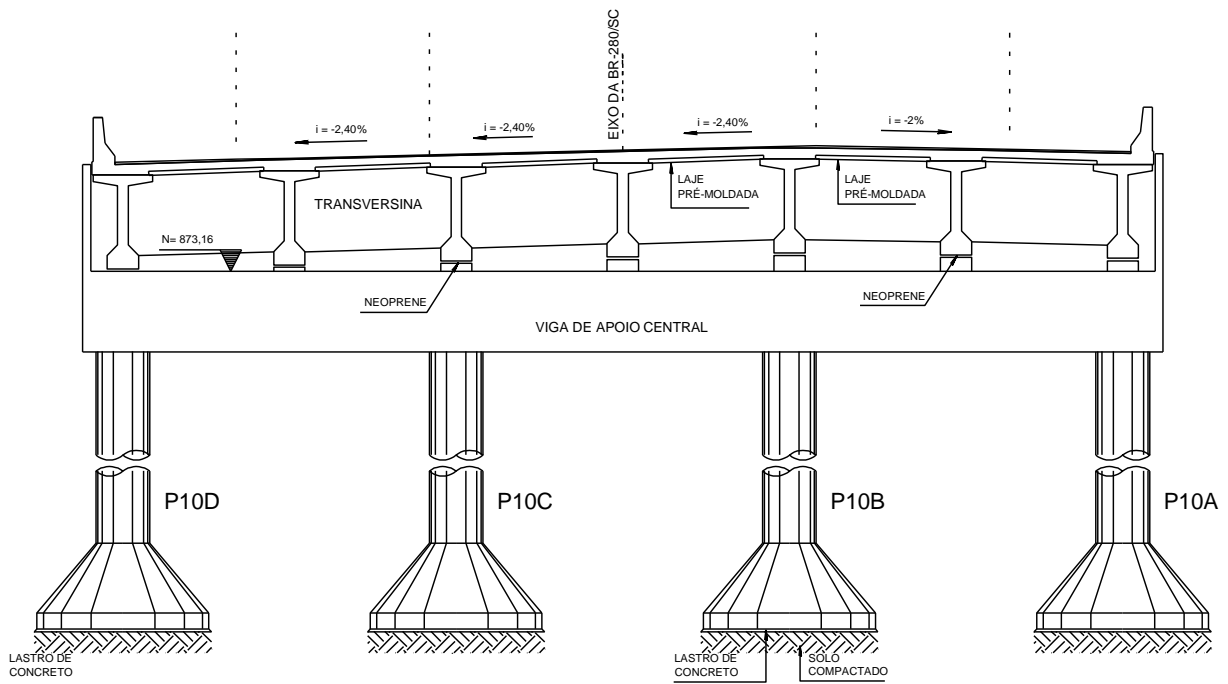


Figura 2 – Seção transversal do Viaduto.

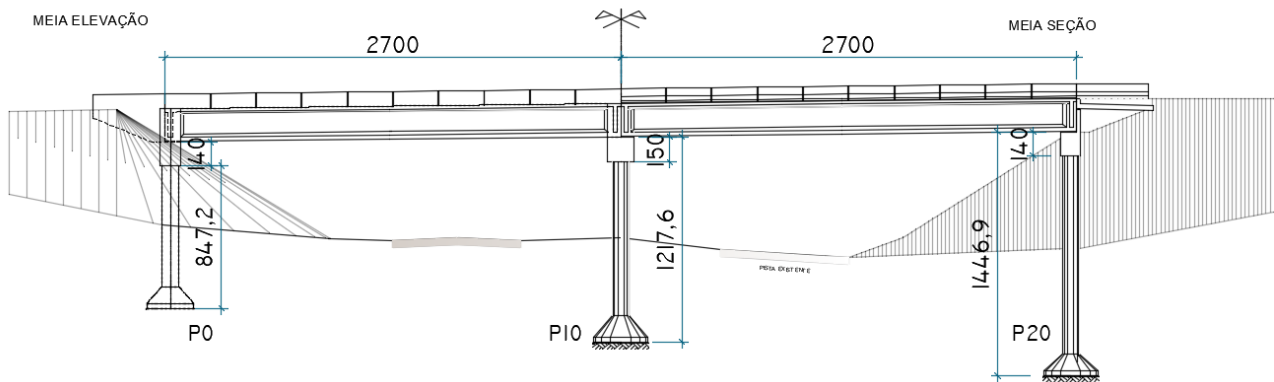


Figura 3 – Seção longitudinal do Viaduto.

A obra foi concebida com uma esconsidade de $18,49^\circ$ a fim de se obter a configuração mais econômica de implantação da obra na rodovia.

As longarinas do Viaduto tratam-se de peças pré-moldadas de concreto armado executadas em seção I com comprimento total de 26,60 metros e extremidades dotadas de almas alargadas para atendimento dos esforços de cisalhamento que ocorrem nessas seções. Na Figura 4 são apresentadas imagens da seção transversal das longarinas e na Figura 5 a elevação da peça.

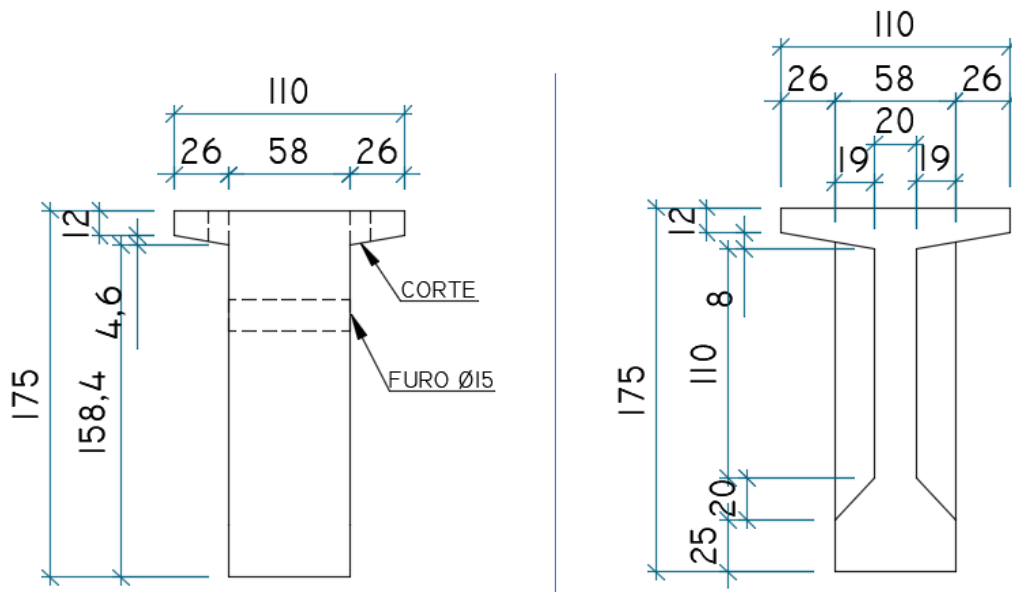


Figura 4 – Seção transversal das longarinas do Viaduto: no apoio e no vão, respectivamente.

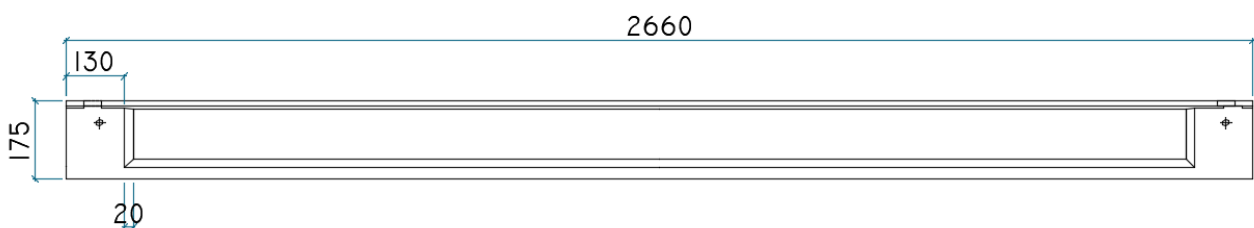


Figura 5 – Elevação das longarinas do Viaduto.

Para a obra foi adotado o uso de concreto classe C35 para os elementos da superestrutura, tendo em vista as maiores solicitações existentes nos elementos e a necessidade de otimização das seções, e classe C25 para os elementos da meso e infraestrutura, atendendo os critérios de durabilidade relacionados à classe de agressividade ambiental, segundo exposto na NBR 6118:2014.

Para estudos das longarinas e pilares do Viaduto em estudo e apresentado no presente artigo foram calculados os esforços solicitantes nesses elementos levando em conta as particularidades de geometria da obra e considerando a atuação do trem tipo TB 45 da NBR 7188:2013, que consiste em uma carga móvel composta por um veículo tipo de 450 kN circundada por uma carga uniformemente distribuída constante de 5 kN/m².

Para análise do estado limite último (dimensionamento das armaduras), tanto para as ações permanentes quanto para as ações acidentais foram considerados os coeficientes de ponderação e de combinação de ações da NBR 8681:2003 para estruturas de pontes, os quais são apresentados nas tabelas 2 e 5 da norma citada.

Nas ações do trem tipo foram considerados, ainda, os coeficientes de ponderação das cargas verticais, quais sejam: coeficiente de impacto vertical, coeficiente do número de faixas (quando aplicável) e coeficiente de impacto adicional.

Para a determinação das cargas atuantes nas longarinas, uma vez que se trata de uma obra de múltiplas vigas, utilizou-se o Processo de Fauchart, que apresenta as seguintes premissas:

- Aplicação a vigas múltiplas sem transversinas intermediárias.
- Trabalho das longarinas conforme a resistência dos materiais.
- Seção com inércia constante e vigas biapoiadas.
- O comportamento longitudinal das lajes é desprezado.

O cálculo das propriedades das vigas para o Processo descrito é realizado com as seguintes equações:

- Mola vertical

$$k_v = \left(\frac{\pi}{l}\right)^4 \times E_{cs} I$$

Equação 01

- Mola a torção

$$k_t = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \times G \times I_t$$

Equação 02

Após avaliação da repartição transversal das cargas e definidos os trens tipo atuantes em cada uma das vigas que compõem a obra, foram obtidas as envoltórias dos esforços solicitantes de momento fletor, esforço cortante e esforço torçor, os quais foram utilizados para obtenção dos valores de cálculo dos para os estados limites último e de serviço.

Para o aço GG 70 foi adotado o módulo de elasticidade de 210 GPa, uma vez que os ensaios de caracterização do material indicaram comportamento similar ao do aço CA-50, e resistência característica de escoamento de 700 MPa.

Para análise dos estados limites de serviço foram adotados os seguintes parâmetros, apresentados na NBR 6118:2014:

- Para análise da fissuração, o cálculo no estágio II foi realizado considerando a relação αe entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto igual a 15 (item 17.3.3.2).
- Para análise da fadiga das armaduras foi considerado o modelo linear elástico com $\alpha e = 10$ (item 23.5.3).
- Para determinação dos deslocamentos nas longarinas foi determinada a rigidez equivalente da peça, que depende do momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II, calculado com $\alpha e = E_s/E_{cs}$ (item 17.3.2.1.1).
- Os fatores de combinações de ações para análise dos deslocamentos e da fissuração foram obtidos na Tabela 6 da NBR 8681:2003.
- Nas combinações de ações para análise da fadiga foi considerado fator de redução $\psi_1 = 0,5$ (NBR 6118:2014, item 23.5.2).
- Os valores limites para máxima variação de tensão na análise da fadiga são aqueles apresentados na Tabela 23.2 da NBR 6118:2014.

Para detalhamento das armaduras das vigas em seção transversal e longitudinal foram considerados os seguintes critérios da NBR 6118:2014:

- Distribuição transversal conforme valores limites para a_v e a_h (item 18.3.2.2).
- Detalhamento da armadura longitudinal com a análise do diagrama decalado (itens 17.4.2.2 e 18.3.2.3).
- Definição dos valores dos comprimentos de ancoragem das armaduras segundo item 9.4.2.

Para a análise dos pilares foi elaborado um modelo numérico de barras, sendo a superestrutura representada por uma barra única de rigidez equivalente, conectada aos pilares através de neoprenes também representados por barras com a respectiva rigidez equivalente. O trecho do fuste imerso no solo tem sua vinculação representada por molas horizontais que visam manter a contenção lateral do solo aos movimentos horizontais, permitindo a identificação da variação dos esforços solicitantes nos elementos verticais (pilares).

As ações atuantes foram definidas de acordo com os critérios apresentados no item 7.2, Forças horizontais, da NBR 7188:2013 e para determinação dos efeitos de vento foram utilizadas as recomendações da NBR 6123:1988.

As ações verticais foram obtidas do modelo de análise das vigas de apoio da obra, considerando os efeitos das cargas permanentes e acidentais das longarinas isoladamente.

O dimensionamento das armaduras dos pilares se deu com a determinação da envoltória dos valores de cálculo, que empregou os fatores de combinação de acordo com a NBR 8681:2003. Para dimensionamento dos pilares para o uso de aço CA-50 foram utilizados os ábacos de dimensionamento para peças submetidas a esforço de flexão composta normal, com o valor do momento de cálculo (M_d) obtido com a resultante dos momentos M_{dx} e M_{dy} atuantes.

Para dimensionamento dos pilares com o uso do aço GG 70 foram utilizados programas computacionais que empregam os processos iterativos de análise de estabilidade com os efeitos de segunda ordem.

4. Aplicação do aço GG 70 em um Viaduto de múltiplas vigas

Quando da análise dos pilares e das longarinas que compõem o Viaduto de estudo foram obtidos os resultados das áreas de aço necessárias tanto para a hipótese de uso do aço CA-50 quando da aplicação do aço GG 70. Os resultados e discussões são apresentados nos itens que seguem.

4.1 Longarinas

Para análise das longarinas que compõem o viaduto o dimensionamento se deu com a definição de 10 seções, a fim de se analisar os esforços em diferentes seções da viga e garantir o adequado detalhamento das armaduras.

Quando do estudo dos esforços atuantes na obra, foram obtidos os valores apresentados nas imagens das figuras que seguem, com valor máximo de momento fletor no meio da seção, de $M_d = 2.862,05$ kN.m, máximo esforço cortante junto aos apoios no valor de 1.579,05 kN e máxima sollicitação por esforço torçor de 55,43 kN.m.

Na hipótese de aplicação do aço CA-50 os resultados para a área de aço das armaduras são apresentados nas imagens da Figura 6 e da Figura 7.

MOMENTOS FLETORES										
SEÇÃO	Mg1 (kNm)	Mg2 (kNm)	Mg3 (kNm)	Mg (kNm)	Mq1 (kNm)	Md1 (kNm)	u1	y1	d (cm)	As1
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	188	0
1	484,35	478,79	352,45	1315,60	1214,57	3597,91	0,017	3,19	188	44,29
2	861,07	851,19	626,58	2338,84	1798,70	5855,49	0,028	5,22	188	72,48
3	1130,15	1117,18	822,39	3069,73	2389,45	7728,30	0,037	6,92	187	96,98
4	1291,61	1276,78	939,87	3508,26	2743,90	8852,00	0,042	7,95	185	112,34
5	1345,42	1329,98	979,04	3654,43	2862,05	9226,56	0,044	8,30	185	117,67
6	1291,61	1276,78	939,87	3508,26	2743,90	8852,00	0,042	7,95	184	113,03
7	1130,15	1117,18	822,39	3069,73	2389,45	7728,30	0,037	6,92	253	71,15
8	861,07	851,19	626,58	2338,84	1798,70	5855,49	0,028	5,22	279	48,79
9	484,35	478,79	352,45	1315,60	1214,57	3597,91	0,017	3,19	280	29,71
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	283	0,00

Figura 6 – Cálculo das armaduras de flexão com o aço CA-50.

ESFORÇOS CORTANTES

SEÇÃO	Vg1 (kN)	Vg2 (kN)	Vg3 (kN)	Vg (kN)	Vq1 (kN)	Vd1 (kN)	VRd2 (kN)	Verificação VRd2>Vd1	Asw1	Aswmin	Asw
0	205,41	203,05	149,47	557,93	550,57	1579,05	2004,66	OK	8,47	7,45	8,47
1	166,38	164,47	121,07	451,92	464,10	1306,24	2004,66	OK	13,44	2,57	13,44
2	131,46	129,95	95,66	357,07	307,45	943,23	2004,66	OK	8,43	2,57	8,43
3	100,65	99,49	73,24	273,39	248,98	742,53	2004,66	OK	5,66	2,57	5,66
4	73,95	73,10	53,81	200,85	195,85	564,93	2004,66	OK	3,20	2,57	3,20
5	51,35	50,76	37,37	139,48	148,08	410,43	2004,66	OK	1,07	2,57	2,57
6	-73,95	-73,10	-53,81	-200,85	-195,85	-564,93	2004,66	OK	3,20	2,57	3,20
7	-100,65	-99,49	-73,24	-273,39	-248,98	-742,53	2004,66	OK	5,66	2,57	5,66
8	-131,46	-129,95	-95,66	-357,07	-307,45	-943,23	2004,66	OK	8,43	2,57	8,43
9	-166,38	-164,47	-121,07	-451,92	-464,10	-1306,24	2004,66	OK	13,44	2,57	13,44
10	-205,41	-203,05	-149,47	-557,93	-550,57	-1579,05	2004,66	OK	8,47	7,45	8,47

ESFORÇOS DE TORÇÃO

SEÇÃO	Tg1 (kNm)	Tg2 (kNm)	Tg3 (kNm)	Tg (kNm)	Tq1 (kNm)	Tsd1 (kNm)	TRd2	Aw90	Asw V+T	Asl/m
0	0,00	0,00	0,00	0,00	55,43	83,14	463,87	1,86	12,20	1,86
1	0,00	0,00	0,00	0,00	47,22	70,84	463,87	1,59	16,62	1,59
2	0,00	0,00	0,00	0,00	31,66	47,49	463,87	1,06	10,56	1,06
3	0,00	0,00	0,00	0,00	25,98	38,98	463,87	0,87	7,40	0,87
4	0,00	0,00	0,00	0,00	20,75	31,13	463,87	0,70	4,60	0,70
5	0,00	0,00	0,00	0,00	15,96	23,94	463,87	0,54	3,64	0,54
6	0,00	0,00	0,00	0,00	-20,75	-31,13	463,87	0,70	4,60	0,70
7	0,00	0,00	0,00	0,00	-25,98	-38,98	463,87	0,87	7,40	0,87
8	0,00	0,00	0,00	0,00	-31,66	-47,49	463,87	1,06	10,56	1,06
9	0,00	0,00	0,00	0,00	-47,22	-70,84	463,87	1,59	16,62	1,59
10	0,00	0,00	0,00	0,00	-55,43	-83,14	463,87	1,86	12,20	1,86

Figura 7 – Cálculo das armaduras devido ao efeito de cisalhamento e torção com uso do aço CA-50.

Os resultados obtidos com os dimensionamentos no estado limite último, apresentados nas imagens das Figuras 6 e 7, foram utilizados para estudo das seções no Estádio II e verificações dos estados limites de serviço (fadiga, fissuração e deslocamento).

Considerando os efeitos combinados dos esforços cortantes e de torção foi obtida a área de aço necessária para os estribos, a qual pode ser vista na imagem da Figura 8. Estas áreas de aço foram ajustadas para atendimento das verificações no estado limite de fadiga, que exigiu a aplicação de maior área de aço considerando os efeitos de esforços cortantes em serviço.

Na mesma figura são apresentadas as áreas de aço necessárias para atendimento dos esforços de flexão positiva, que foram definidas a partir da análise da peça no estado limite último.

SEÇÃO	As, adotada			Asw, adotada			
0	15	Ø 20	47,1 cm ²	Ø 12,5	c/ 12	2 R	20,45 cm ² /m
1	15	Ø 20	47,1 cm ²	Ø 12,5	c/ 15	2 R	16,36 cm ² /m
2	24	Ø 20	75,4 cm ²	Ø 12,5	c/ 20	2 R	12,27 cm ² /m
3	32	Ø 20	101 cm ²	Ø 12,5	c/ 20	2 R	12,27 cm ² /m
4	36	Ø 20	113 cm ²	Ø 10	c/ 20	2 R	7,854 cm ² /m
5	38	Ø 20	119 cm ²	Ø 10	c/ 20	2 R	7,854 cm ² /m
6	22	Ø 20	69,1 cm ²	Ø 12,5	c/ 20	2 R	12,27 cm ² /m
7	20	Ø 20	62,8 cm ²	Ø 12,5	c/ 20	2 R	12,27 cm ² /m
8	16	Ø 20	50,3 cm ²	Ø 12,5	c/ 15	2 R	16,36 cm ² /m
9	10	Ø 20	31,4 cm ²	Ø 12,5	c/ 12	2 R	20,45 cm ² /m
10	8	Ø 20	25,1 cm ²	Ø 12,5	c/ 12	2 R	20,45 cm ² /m

Figura 8 – Cálculo das armaduras para a hipótese de uso do aço CA-50 (armaduras longitudinais inferiores e estribos, respectivamente).

Para o uso do aço GG 70, considerando os mesmos esforços solicitantes apresentados anteriormente, chegou-se às seguintes áreas de aço necessárias.

SEÇÃO	As, adotada			Asw, adotada			
0	8	Ø 20	25,1 cm ²	Ø 12,5	c/ 12	2 R	20,45 cm ² /m
1	12	Ø 20	37,7 cm ²	Ø 12,5	c/ 15	2 R	16,36 cm ² /m
2	19	Ø 20	59,7 cm ²	Ø 12,5	c/ 20	2 R	12,27 cm ² /m
3	26	Ø 20	81,7 cm ²	Ø 12,5	c/ 20	2 R	12,27 cm ² /m
4	29	Ø 20	91,1 cm ²	Ø 10	c/ 20	2 R	7,854 cm ² /m
5	30	Ø 20	94,2 cm ²	Ø 10	c/ 20	2 R	7,854 cm ² /m
6	29	Ø 20	91,1 cm ²	Ø 12,5	c/ 20	2 R	12,27 cm ² /m
7	26	Ø 20	81,7 cm ²	Ø 12,5	c/ 20	2 R	12,27 cm ² /m
8	19	Ø 20	59,7 cm ²	Ø 12,5	c/ 15	2 R	16,36 cm ² /m
9	12	Ø 20	37,7 cm ²	Ø 12,5	c/ 12	2 R	20,45 cm ² /m
10	8	Ø 20	25,1 cm ²	Ø 12,5	c/ 12	2 R	20,45 cm ² /m

Figura 9 – Cálculo das armaduras para a hipótese de uso do aço GG-70 (armaduras longitudinais inferiores e estribos, respectivamente).

É possível observar o mesmo resultado de área de aço necessária para o caso dos estribos, uma vez que a tensão na armadura transversal passiva é limitada ao valor de 435 MPa, conforme disposto no item 17.4.2.2 da NBR 6118:2014.

No caso das vigas em estudo, foi identificado que na verificação da fissuração para o estudo com o emprego do aço GG 70 foi necessário aumentar a área de aço em relação ao valor calculado no estado limite último, em virtude da existência de maiores tensões em serviço e conseqüente maior relevância dos efeitos da fissuração.

Com os resultados apresentados anteriormente foi possível realizar a detalhamento das vigas, sendo apresentado na Figura 10 o detalhamento transversal da seção mais solicitada pelos momentos fletores (meio do vão), sendo possível observar a diferença de densidade de armaduras para cada uma das situações de análise.

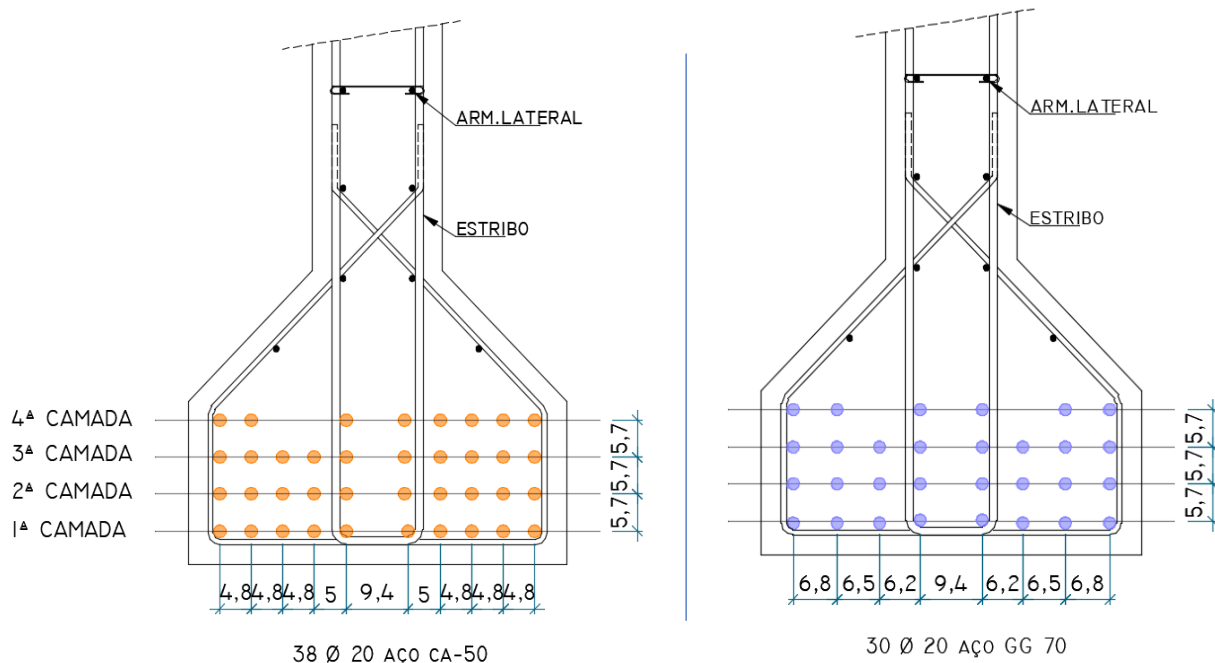


Figura 10 – Detalhamento das armaduras positivas de flexão na seção central do vão, para o uso do aço CA-50, à esquerda, e para uso do aço GG 70, à direita.

Quando do detalhamento das armaduras e quantificação do material, verifica-se, então, que para a obra estudada o uso de aço GG 70 para atendimento dos esforços de flexão atuantes nas longarinas resulta em uma economia de 13% do peso total da área de aço para esses elementos, como pode ser visto no resumo apresentado na tabela abaixo.

Tabela 1 - Armaduras para as longarinas

Aço CA-50 (kg)	Aço GG 70 (kg)	Diferença em peso (kg)	Diferença %
26770,70	23285,68	-3485,03	-13%

No caso dos pilares, conforme informado no capítulo anterior, o cálculo dos esforços atuantes foi realizado com o uso de um modelo computacional com elementos de barras. Do modelo foram obtidos os valores dos momentos fletores atuantes M_x e M_y , os quais foram utilizados para obtenção dos momentos resultantes, que são indicados na Tabela 2 junto aos valores dos esforços verticais atuantes (N_d), advindos das ações nas longarinas.

Tabela 2 – Solicitações nos pilares

Pilar	$N_{d,máx}$ (kN)	$N_{d,min}$ (kN)	M_d (kN.m)
POA	2091,69	934,73	1051,12
POB	3736,44	1704,40	1051,12
P10A	4183,67	1869,46	1068,84
P10B	7472,88	3408,80	1068,44
P20A	2091,69	934,73	1642,02
P20B	3736,44	1704,40	1642,02

As ações atuantes na mesoestrutura que resultaram nas solicitações apresentadas na Tabela 2 são o efeito de frenagem e aceleração, empuxo assimétrico nas cortinas, empuxo do solo direto nos pilares, temperatura e retração, vento e, ainda, foi considerado o efeito da esconsidade da obra.

No dimensionamento dos pilares quando do emprego do aço CA-50 e do GG 70 foram obtidos os seguintes resultados de armaduras longitudinais necessárias:

Tabela 3 – Armaduras adotadas para os pilares

Pilar	Aço CA-50	Aço GG 70
P0A	20Ø20	16Ø20
P0B	20Ø20	16Ø20
P10A	20Ø20	16Ø20
P10B	20Ø20	16Ø20
P20A	22Ø25	14Ø25
P20B	22Ø25	14Ø25

A partir do detalhamento das armaduras foi elaborada a quantificação do material, tendo-se obtido os seguintes resultados para o caso dos pilares do Viaduto em estudo.

Tabela 3 - Armaduras para os pilares

Aço CA-50 (kg)	Aço GG 70 (kg)	Diferença em peso (kg)	Diferença %
10.904,57	8.248,84	-2.655,73	-24,35%

Destaca-se que na Tabela 3 são apresentados os valores totais de área de aço, considerando os 12 pilares que compõem a obra.

Observa-se, então, que considerando todos os pilares da obra é possível de se observar uma redução de consumo de 24,35% quando do uso do aço GG 70 em comparação a aplicação do aço CA-50.

Conclusões

O presente artigo teve como objetivo apresentar um primeiro estudo de aplicação do aço GG 70 para obras de infraestrutura, no caso, a aplicação em um viaduto de concreto armado em múltiplas vigas.

Do estudo das longarinas foi verificado que o uso do aço GG 70 reduz a densidade de armaduras nas seções mais solicitadas, o que traz benefícios do ponto de vista de execução. Quando da análise do estado limite de serviço relacionado à fissuração, foi identificada a necessidade de utilizar uma maior área de aço para controle das tensões em serviço no caso do uso do aço GG 70, o que é uma situação comum em obras de arte especiais. Após o detalhamento das armaduras das longarinas verificou-se que com o uso do aço GG 70 seria possível reduzir em 13%, ou seja, 3485,03 kg de aço em comparação ao uso do aço CA-50, considerando todas as longarinas da obra.

Sobre o comportamento do aço aplicado nas longarinas vale destacar, ainda, que em paralelo ao desenvolvimento do presente estudo estão sendo elaborados ensaios complementares para caracterização do material, como o ensaio de fadiga e o ensaio de determinação do coeficiente de conformação superficial, a fim de confirmar o comportamento do material nas situações de serviço.

Da análise dos pilares foi possível concluir que o emprego do aço GG 70 para detalhamento das armaduras longitudinais resultou em uma redução de aproximadamente 24% da área de aço total desses elementos.

As análises realizadas até o presente momento permitem concluir que o aço GG 70 possui boa vantagem em relação ao uso do aço CA-50 no caso de elementos estruturais de grande porte, inclusive em obras com geometrias e vãos superiores à obra apresentada no presente estudo. Nesse sentido, destaca-se que as informações apresentadas no presente artigo fazem parte de uma pesquisa que visa avaliar a aplicação do material em diversas morfologias de obras de arte especiais. Dessa forma, encontra-se em estudo a aplicação do aço GG 70 em obras compostas por duas vigas e em seção caixão, a fim de dar continuidade ao estudo apresentado neste artigo.

Referências

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 6123:** Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7187:** Projeto de pontes de concreto armado e concreto protendido. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7188:** Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681:** Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.