

ESTUDO DE CASO DA PONTE EM ESTRUTURA MISTA SOBRE O RIO ARATAÚ NA BR 230/PA

Cristiano Hoss¹, Jorge Luis Palomino Tamayo^{2*} e Inácio Benvegnu Morsch³

¹ Mestrado em Estruturas – PPGECE – UFRGS, cristiano@hossehoffman.com

² Doutor – PPGECE – UFRGS, jorge.tamayo@ufrgs.br

^{3*} Autor correspondente. Doutor – PPGECE – UFRGS, morsch@ufrgs.br

Resumo: Pontes com soluções em estruturas mistas são executadas com grande recorrência no cenário nacional e mundial. O Brasil enfrenta uma realidade de envelhecimento das estruturas que compõem sua infraestrutura, entre estas as pontes, que necessitam de reabilitação e readequação imediata. Até pouco tempo esses projetos tinham como base a norma NBR 8800. No entanto esse contexto foi alterado pelo lançamento da NBR 16694 em 2020, a qual centraliza os conceitos e procedimentos para o dimensionamento analítico de pontes mistas. Seja num projeto de uma ponte nova ou num projeto de reabilitação, análises através de modelos numéricos empregando o método dos elementos finitos (MEF) são cada vez mais usuais. Logo uma questão que surge é se a análise de elementos finitos é apenas complementar ou se a mesma pode substituir a abordagem analítica? Para responder essa questão, este trabalho apresenta um estudo de caso do projeto de readequação e reforço da ponte em estruturas mistas sobre o rio Arataú na BR230/PA. Os resultados obtidos mostram que o modelo com barras de pórtico associado a abordagem analítica com critérios normativos possui limitações com relação a previsão de deslocamentos e tensões para este tipo de estrutura.

Palavras-chave: pontes mistas de aço-concreto, elementos finitos, reforço, reabilitação.

1 Introdução

Parte das obras de arte existentes no Brasil são pontes e viadutos em estruturas mistas, nos quais a laje de concreto armado é solidarizada com os perfis de aço por meio de conectores de cisalhamento. Esse tipo de solução permite a priori empregar os materiais aço e concreto de modo mais eficiente. Conforme Nakamura e Collin (2010), outra razão que ajudou na popularização de estruturas mistas é o fato dos perfis de aço sozinhos serem autoportantes suportando as cargas de serviço, como por exemplo a montagem de formas, reduzindo assim o tempo de execução da obra. As vigas de alma

<http://dx.doi.org/10535/rsaae.v19i1.12810>

<http://seer.upf.br/index.php/rsaae/article/view/12810>

cheia soldadas se destacam neste cenário devido à flexibilidade de variação das seções com ganho de inércia e rigidez localizada.

No Brasil as pontes em vigas de alma cheia e seção caixão foram usadas em diversas obras rodoviárias. Na cidade do Rio de Janeiro, os elevados da Perimetral e da Linha Vermelha, com consumo de aço da ordem de 25.000 e 31.000 toneladas de aço, são exemplos deste tipo de estrutura. A figura 1 apresenta estas obras, em fase de execução.



Figura 1 – (a) Elevado da Perimetral - (b) Elevado da Linha Vermelha

No cenário mundial uma realidade que afeta todos os países é o envelhecimento da infraestrutura e a necessidade de se conservar a mesma ao menos minimamente. Conforme Carvalho e Calixto (2019) o Brasil possui um sistema rodoviário com grande parte das pontes construídas antes de 1984. Projetos estes realizados de acordo com a antiga NB-6 de 1982. Apesar das pontes não terem completado ainda um ciclo de vida útil de 50 anos, dependendo das suas condições de manutenção e conservação, a sua capacidade de carga pode ser inconsistente com a realidade das cargas do tráfego atual.

No Brasil os colapsos totais ou parciais de pontes e viadutos também são uma realidade. A obra analisada neste estudo, a ponte mista sobre o rio Arataú no Pará, durante sua operação sofreu dois colapsos. O primeiro colapso ocorreu em agosto de 2014 e o segundo em novembro de 2015, devido ao tráfego de um caminhão carregado de

madeira, com carga estimada em 90 toneladas, impossibilitando o uso da estrutura até a sua reabilitação no ano de 2020.

Para a readequação e reabilitação das pontes em estruturas mistas no Brasil são empregadas as abordagens analíticas com base nos critérios normativos da NBR 8800 (2008) com complementação dos critérios normativos da ASSHTO-LFRD(2012) e do Eurocode 4 (2005). Com a publicação da NBR 16694 (2020), os critérios necessários para a abordagem analítica estão agrupados e delimitam o campo de aplicação. Com relação à análise estrutural, esta norma permite o emprego dos métodos das forças e deslocamentos, métodos das diferenças finitas, elementos finitos e faixas finitas. Barra, Palhares e Brisola (2021), apresentam os conceitos e procedimentos da NBR 16694 e concluem que apesar de recente, o texto normativo, cobre todos os aspectos atrelados ao projeto de pontes em estruturas mistas de forma satisfatória.

As abordagens numéricas empregando modelos com elementos finitos são cada vez mais usuais na prática da engenharia de estruturas. Entre os softwares comerciais, podem ser citados: *SAP*, *CSI Bridge*, *SCIA Engineer*, *MIDAS* e *STRAP*, que possuem códigos direcionados para a análise e dimensionamento de pontes em estruturas mistas. Nesse contexto, muitas pesquisas associadas com vigas mistas foram realizadas nos últimos anos. No Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC/UFRGS) tem sido desenvolvido um código computacional para análise de vigas mistas (VIMIS).

O código computacional VIMIS teve início com a pesquisa de Tamayo (2011), que implementou a possibilidade de análise da viga mista até a falha considerando cargas de curta duração. Dias (2013) e Moreno (2016), implementaram a análise considerando cargas de serviço de longa duração e testaram modelos para consideração dos efeitos de fluência e retração. Wayar (2016) e De Franco (2018), implementaram os recursos de

protensão externa e interna. Sanches (2020) implementou a formulação correspondente à análise não linear geométrica. A formulação dos elementos finitos adotados no modelo numérico, as relações constitutivas dos materiais considerados e os algoritmos de solução, podem ser consultados nos trabalhos supracitados. Atualmente, se está investigando o processo construtivo com a consideração dos efeitos diferidos.

Considerando as duas abordagens de análise, a numérica e a analítica, é possível comparar os resultados e verificar as limitações e ganhos atrelados a cada uma. Com a abordagem numérica é possível reproduzir de forma mais adequada o comportamento dos materiais e da estrutura, porém, este processo demanda maior tempo de modelagem e análise. Com a abordagem analítica tem-se um processo mais expedito, porém com muitas simplificações incorporadas. Neste trabalho, considera-se um estudo de caso correspondente à readequação da ponte sobre o rio Arataú e faz-se uma comparação entres os processos de análise e seus correspondentes resultados.

2 Estrutura analisada

A ponte sobre o rio Arataú, entrou em operação nos anos 90, possui extensão total de 168,90m, com 4 vãos na ordem de 30,0m e 2 vãos na ordem de 22,00m, todos isostáticos. A seção transversal da ponte, na situação inicial, é composta por uma faixa de rolamento de 3,30m e duas barreiras New Jersey de 0,40m, totalizando uma largura de 4.10m. A superestrutura da obra é composta por duas vigas mistas de alma cheia com laje de concreto armado e seis vãos isostáticos variáveis. A altura estrutural da superestrutura, vigas de aço mais laje de concreto, é de 1.32m nos vãos extremos e de 1.67m nos vãos intermediários. A Figura 2 apresenta o perfil longitudinal da ponte, na situação colapsada, e a planta baixa com identificação das vigas do projeto alargado.

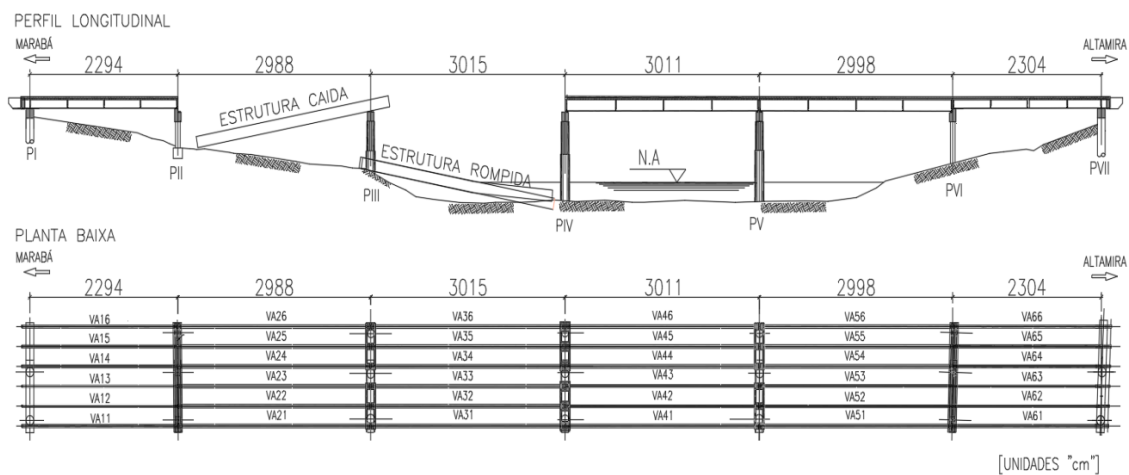


Figura 2 – Perfil longitudinal e planta baixa

A obra em questão é parte do acervo de obras do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT), que foram reforçadas e ampliadas com vista ao desenvolvimento da infraestrutura nacional. O projeto básico foi elaborado prevendo uma obra rodoviária final em estrutura mista, superestrutura com 6 longarinas de aço patinado e laje de concreto armado, com largura de 14.30m e extensão de 168.90m, conforme figura 3.

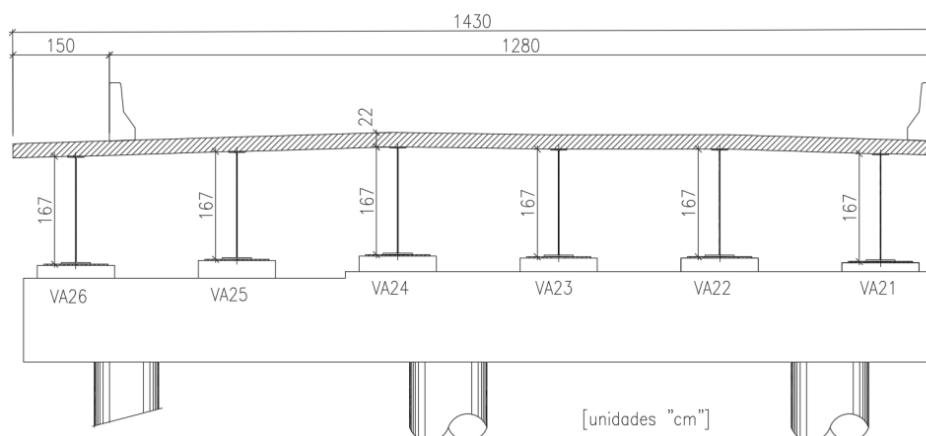


Figura 3 – Seção transversal da obra alargada

3 Abordagem analítica

As pontes e viadutos passam por diversas etapas de execução e necessitam ser verificadas quanto a sua capacidade portante durante cada fase construtiva. Nesta

análise as fases de construção/utilização são divididas em três. Na primeira fase, denominada de “Inicial” tem-se somente o perfil de aço, sem escoramento. A segunda fase, “Longa Duração”, é caracterizada pela cura do concreto da laje e a seção resistente é formada pela viga de aço mais a laje de concreto. Nesta fase são executadas as barreiras rígidas, capa de concreto asfáltico CBUQ e acessos. A terceira fase, “Curta Duração”, é a liberação da estrutura para o tráfego. A seção resistente é mesma da segunda fase, porém os carregamentos móveis são tratados como cargas transitórias e a capacidade portante da seção mista para estas cargas é maior.

As propriedades das seções mistas são então calculadas para cargas de longa e curta duração transformando-se a seção transversal em uma seção fictícia, alterando-se as relações modulares $n = E_s/E_c$, em que E_s e E_c são os módulos de elasticidade do aço e do concreto, respectivamente (ASSHTO-LRFD, 2012). As relações modulares n mudam de acordo com a natureza das cargas consideradas e as fases de construção (LEBETeHIRT, 2013). Para a 1ª fase são feitas as verificações de resistência para as cargas de construção com apenas as propriedades do perfil de aço. Após a cura da laje de concreto, são considerados dois casos distintos de resistência da seção mista, um para o caso de cargas de curta duração (tráfego, vento) e o caso de cargas de longa duração (peso próprio, sobrecarga permanente, acabamentos).

Para calcular as propriedades da seção mista é necessário definir a largura efetiva (b_e) da laje de concreto colaborante, conforme os critérios da NBR 16694, que remete aos critérios normativos da NBR 8800. Essas larguras estão apresentadas para cada viga na Tabela 1.

Vigas	1	2=3	4=5	6
b_e (cm)	207	250	250	223

Tabela 1 – Largura colaborante da laje de concreto

A Tabela 2 apresenta o resumo das propriedades geométricas tais como área da seção transversal “ A ” em questão e o segundo momento de área “ I ” das vigas mistas para as fases inicial, curta e longa duração, sendo que os subscritos CD e LD indicam curta e longa duração, respectivamente, e o subscrito “a” refere-se ao caso da viga metálica agindo isoladamente.

Vão	Fase/Propriedades	Vigas					
		1	2=3	4=5	6		
1 e 6	Inicial	A_a (m ²)	0,0290	0,0348	0,0284	0,0284	
		I_a (m ⁴)	0,0077	0,0089	0,0076	0,4836	
	Curta Duração	A_{CD} (m ²)	0,0901	0,1086	0,1022	0,0943	
		I_{CD} (m ⁴)	0,0264	0,0288	0,0268	0,0262	
	Longa Duração	A_{LD} (m ²)	0,0493	0,0594	0,0530	0,0504	
		I_{LD} (m ⁴)	0,0190	0,0210	0,0199	0,0191	
	2 e 3	Inicial	A_a (m ²)	0,0414	0,0414	0,0414	0,0414
			I_a (m ⁴)	0,0160	0,0160	0,0160	0,0160
Curta Duração		A_{CD} (m ²)	0,1025	0,1152	0,1152	0,1072	
		I_{CD} (m ⁴)	0,0517	0,0544	0,0544	0,0528	
Longa Duração		A_{LD} (m ²)	0,0617	0,0660	0,0660	0,0633	
		I_{LD} (m ⁴)	0,0357	0,0383	0,0383	0,0367	
4 e 5		Inicial	A_a (m ²)	0,0414	0,0533	0,0414	0,0414
			I_a (m ⁴)	0,0160	0,0247	0,0160	0,0160
	Curta Duração	A_{CD} (m ²)	0,1025	0,1271	0,1152	0,1072	
		I_{CD} (m ⁴)	0,0517	0,0601	0,0544	0,0528	
	Longa Duração	A_{LD} (m ²)	0,0617	0,0779	0,0660	0,0633	
		I_{LD} (m ⁴)	0,0357	0,0439	0,0383	0,0367	

Tabela 2 – Propriedades das vigas para cada fase de análise

A norma NBR 7188 (2013) estabelece os valores básicos de cargas móveis e de pedestres a serem consideradas nos projetos de pontes, viadutos e passarelas. Para as obras rodoviárias a carga padrão é o TB45. Concomitante a esta carga, a norma exige a consideração da carga de multidão de 5kN/m² aplicada à pista de rolamento e ainda uma carga de 3kN/m² aplicada nos passeios.

Dada a configuração da seção transversal da estrutura, aplicam-se neste trabalho os métodos de distribuição transversal de Engesser-Courbon e Fauchart para definir o trem-tipo de cada viga de aço conforme Almeida (2015).

Para a aplicação do método de distribuição de Engesser-Courbon de forma adequada é necessário que sejam projetadas transversinas com grande rigidez para garantir um comportamento rígido transversal. No projeto tem-se transversinas de concreto armado sobre os apoios e transversinas de aço intermediárias espaçadas a cada 6,0m. Para cada vão de estrutura tem-se então 5 transversinas, duas de concreto armado e 3 de aço. Apesar das transversinas, também é aplicado o método de Fauchart para comparação dos valores de carga móvel absorvida por cada longarina. A tabela 3 apresenta os valores da carga por eixo do trem tipo e da carga de multidão para cada longarina.

Viga		1	2	3	4	5	6
Courbon	Q (kN)	72,80	53,70	34,90	35,50	46,70	60,90
	q (kN/m)	16,77	11,40	13,68	13,08	12,92	14,61
Fauchart	Q (kN)	62,33	46,84	38,33	38,33	46,84	62,33
	q (kN/m)	13,02	14,35	14,62	14,62	14,35	13,02

Tabela 3 – Resumo de carregamentos móveis

Quantificados os carregamentos atuantes, as fases de atuação e as propriedades das vigas mistas em cada fase, elabora-se o modelo de análise. O modelo da ponte foi analisado através do *software* STRAP 2013. Trata-se de um modelo plano com aplicação de barras de pórtico, subdivido por fases de construção e utilização. A figura 4 ilustra o modelo matemático considerado com os vãos adotados e a numeração dos nós. Os nós de apoio têm numeração com dezena fechada (110, 120, 130). Entre apoios tem-se 10 elementos e 9 nós, sendo que o nó da seção central apresenta numerações do tipo 115, 125, 135.

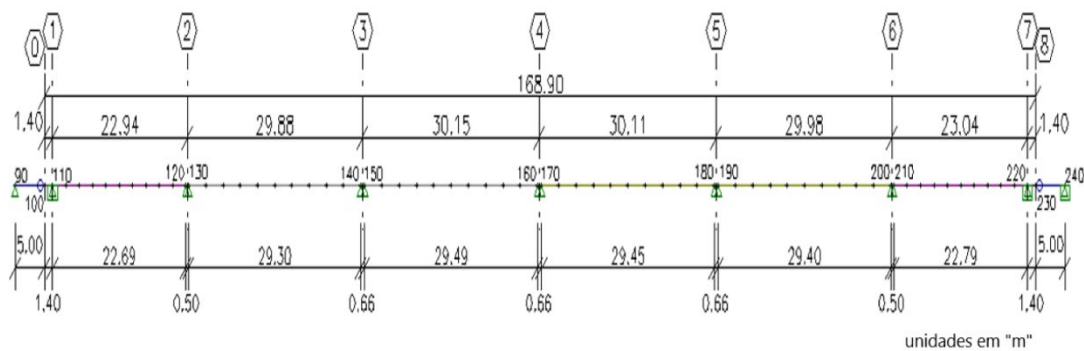


Figura 4 – Modelo de análise

Para cada viga de aço foi elaborado um modelo de análise dividido em estágios de carregamento conforme fases executivas. Os resultados obtidos são a envoltória de esforços solicitantes (V para esforço cortante e M para momento fletor), apresentados na tabela 4.

O dimensionamento das vigas de aço consiste na realidade em uma verificação, na qual são comparados os esforços atuantes com as capacidades resistentes das geometrias e seções transversais de aço empregadas no projeto da ponte mista. A NBR 16694 (2020) estabelece os processos de verificação de acordo com as fases construtivas. Na primeira fase, em pontes construídas sem escoramento, aonde somente as vigas de aço compõem o sistema de sustentação, as verificações do Estado Limite Último (ELU) devem ser realizadas conforme as recomendações dos Anexos G e H da NBR 8800 (2008). Na segunda fase, após o lançamento das lajes de concreto armado e a cura do concreto, as vigas mistas devem ser verificadas como vigas mistas de acordo com os critérios estabelecidos no Anexo O da NBR 8800 (2008). Cabe destacar que a NBR 16694 (2020) não permite interação parcial entre a laje de concreto e os perfis de aço, somente interação completa, o que exige um número maior de conectores de cisalhamento.

		Vigas de Aço					
Nó	Carregamento	1	2	3	4	5	6
110	V_g (kN)	268	370	370	240	289	214
	V_Q (kN)	392	279	253	239	277	335
	M_g (kNm)	-205	-224	-224	-212	-226	-177
	M_Q (kNm)	-275	-199	-157	-148	-186	-233
115	M_g (kNm)	1371	1931	1931	1202	1471	1084
	M_Q (kNm)	2189	1557	1415	1340	1456	1874
120	V_g (kN)	-250	-350	-350	-221	-269	-199
	V_Q (kN)	-387	-276	-250	-236	-265	-332
130	V_g (kN)	346	474	474	308	371	277
	V_Q (kN)	452	320	301	285	323	388
135	M_g (kNm)	2534	3471	3471	2255	2720	2030
	M_Q (kNm)	3266	2313	2176	2063	2334	2804
150	V_g (kN)	348	477	477	310	374	279
	V_Q (kN)	454	321	302	286	324	389
155	M_g (kNm)	2567	3517	3516	2285	2756	2057
	M_Q (kNm)	3301	2338	2201	2087	2360	2834
170	V_g (kN)	348	476	476	310	373	279
	V_Q (kN)	451	320	300	286	322	387
175	M_g (kNm)	2561	3507	3507	2278	2748	2051
	M_Q (kNm)	3293	2332	2195	2081	2354	2827
190	V_g (kN)	347	476	476	309	373	278
	V_Q (kN)	448	317	298	282	320	384
195	M_g (kNm)	2552	3495	3495	2271	2738	2044
	M_Q (kNm)	3285	2326	2189	2076	2348	2820
210	V_g (kN)	252	352	352	222	271	200
	V_Q (kN)	393	280	254	233	278	336
215	M_g (kNm)	1381	1948	1948	1211	1485	1094
	M_Q (kNm)	2205	1568	1426	1350	1559	1887
220	V_g (kN)	-269	-371	-371	-240	-290	-215
	V_Q (kN)	-392	-279	-253	-240	-277	-336
	M_g (kNm)	-205	-223	-223	-212	-226	-177
	M_Q (kNm)	-280	-202	-160	-150	-189	-237

Tabela 4 – Solicitações características
(g – cargas permanentes, Q – carga móvel)

Para cada viga mista foram realizadas as análises conforme recomendações da NBR 16694 (2020) e os esforços resistentes calculados foram comparados com as solicitações de cálculo provenientes das combinações para Estado Limite Último. As combinações são realizadas para a fase construtiva e para a fase de uso da estrutura. Os coeficientes de majoração para a fase construtiva são estabelecidos conforme a NBR 8800 (2008), com o valor de 1.15 (peso próprio das vigas de aço) e 1.25 (elementos de concreto

executados in loco). Para a fase de utilização, os coeficientes para majoração das solicitações permanentes e móvel, fornecidos pela NBR 8681 (2004), possuem o valor de 1.35 (cargas permanentes agrupadas) e 1.50 respectivamente.

As análises para estabelecer os esforços resistentes de cada viga de aço são realizadas por código computacional desenvolvido pelos autores. O código contempla a programação dos anexos G, H e O da NBR 8800 (2008), adota os ponderadores da NBR 8681 (2004) e os critérios estabelecidos na NBR 16694 (2020).

A tabela 5, apresenta o resumo da capacidade de trabalho da seção mista. É possível verificar se as seções transversais adotadas possuem capacidade portante para cada fase de solicitações que a estrutura está sujeita.

VIGA	Vão Larg. Colab.			Perfil de Aço				Seção Mista		Solicitações	
	L (m)	h_{laje}	b_{fc}	V_{Rd}	M_{Rd_FLT}	M_{Rd_FLM}	M_{Rd_FLA}	V_{Rd}	M_{Rd}	Vsd	Msd
VA11	23,00	0,22	2,07	2661,5	1777,0	2400,0	3670,0	2661,5	6151,0	950,0	5647,1
VA12 = VA13 - Exist/Refor.	23,00	0,22	2,50	2661,5	2580,0	4260,0	3290,0	2661,5	5615,8	879,0	5290,9
VA14 e VA15	23,00	0,22	2,50	2661,5	1750,0	2370,0	3610,0	2661,5	5465,9	806,0	4844,0
VA16	23,00	0,22	2,23	2661,5	1750,0	2370,0	3610,0	2661,5	5526,0	792,0	4779,7
VA21	30,00	0,22	2,07	3190,1	3500,0	4740,0	7170,0	3190,1	9836,1	1146,0	8991,1
VA22 a VA25	30,00	0,22	2,50	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	8844,1	1121,0	8930,4
VA26	30,00	0,22	2,23	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	9673,9	957,0	7668,1
VA31	30,00	0,22	2,07	3190,1	3500,0	4740,0	7170,0	3190,1	9836,1	1146,0	8991,1
VA32 a VA35	30,00	0,22	2,50	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	8844,1	1146,0	8991,1
VA36	30,00	0,22	2,23	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	9673,9	957,0	7668,1
VA41	30,00	0,22	2,07	3190,1	3500,0	4740,0	7170,0	3190,1	9836,1	1146,0	8991,1
VA42 = VA43 - Exist/Refor.	30,00	0,22	2,50	3193,5	7760,0	8960,0	6980,0	3193,5	10868,7	1121,0	8767,2
VA44 e VA45	30,00	0,22	2,50	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	8844,1	1146,0	8991,1
VA46	30,00	0,22	2,23	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	9673,9	957,0	7668,1
VA51	30,00	0,22	2,07	3190,1	3500,0	4740,0	7170,0	3190,1	9836,1	1146,0	8991,1
VA52 = VA53 - Exist/Refor.	30,00	0,22	2,50	3188,7	7660,0	8830,0	6840,0	3188,7	10834,1	1118,0	8961,2
VA54 e VA55	30,00	0,22	2,50	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	8844,1	1146,0	8991,1
VA56	30,00	0,22	2,23	3190,1	2610,0	3890,0	5910,0	3190,1	9673,9	957,0	7668,1
VA61	23,00	0,22	2,07	2661,5	1777,0	2400,0	3670,0	2661,5	6146,8	929,0	5675,5
VA62 = VA63 - Exist/Refor.	23,00	0,22	2,50	2661,5	2580,0	4260,0	3290,0	2661,5	5642,0	894,0	5543,4
VA64 e VA65	23,00	0,22	2,50	2661,5	1750,0	2370,0	3610,0	2661,5	5459,5	752,0	4880,9
VA66	23,00	0,22	2,23	2661,5	1750,0	2370,0	3610,0	2661,5	5520,5	774,0	4814,4

Tabela 5 – Verificação estrutural das vigas mistas

4 Modelo numérico em elementos finitos - VIMIS

A abordagem numérica aplicada neste trabalho é limitada à verificação da capacidade portante das vigas mistas para os carregamentos normativos. As vigas são modeladas considerando a largura efetiva definida conforme as recomendações normativas. A consideração de uma largura colaborante introduz limitações nos modelos de análise conforme investigado por Reginato (2017), porém, mantém as mesmas condições de contorno das vigas analisadas na abordagem analítica.

Diferentes elementos finitos são empregados na elaboração do modelo de vigas mistas. A laje de concreto é modelada com elementos quadriláteros de casca degenerada com oito nós sendo que, cada nó tem 5 graus de liberdade (três deslocamentos e duas rotações). As vigas de aço e os enrijecedores são modelados com elementos de casca plana de quatro nós, com 6 graus de liberdade por nó. Os conectores de cisalhamento tipo *stud bolts* são representados por elementos de barra conectando o plano médio da aba superior da viga de aço ao plano médio da laje de concreto. A figura 5 ilustra o modelo adotado para as vigas mistas.

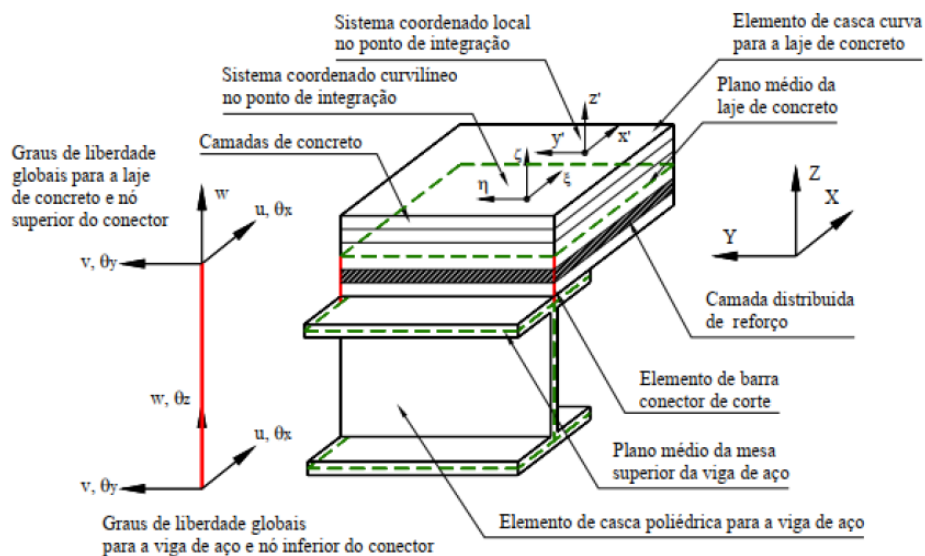


Figura 5 – Modelo numérico para vigas mistas (fonte: TAMAYO, 2011).

A ponte sobre o rio Arataú possui um total de 36 vigas mistas, sendo 6 vigas por vão e 6 vãos isostáticos. Destas vigas 8 são existentes reforçadas e 28 são novas. Foram elaborados 14 modelos para a representação do conjunto total. No primeiro grupo foram modeladas as vigas mistas novas com a largura colaborante de laje calculada pelas recomendações normativas. O segundo grupo é formado pelas vigas mistas reforçadas, também modeladas com a largura efetiva normativa, conforme figura 6.

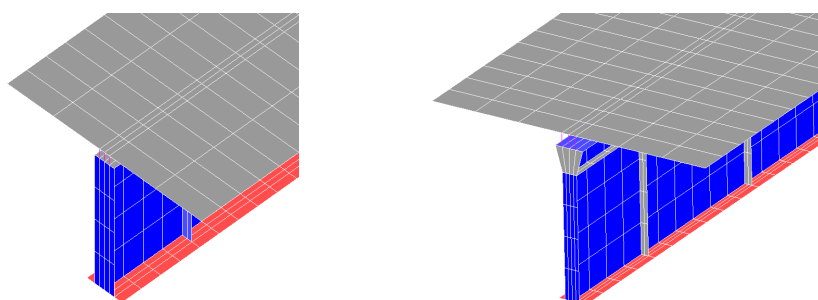


Figura 6 – Modelo vigas mistas isoladas novas e reforçadas com VIMIS

Empregou-se uma malha com elementos de 25 cm de comprimento na direção longitudinal, buscando compatibilizar a laje, conectores e viga de aço, com o auxílio do software GID. Os studs apresentam espaçamentos diferenciados, sendo que nos extremos das vigas tem-se 2 studs Ø25 a cada 25cm e no vão central das vigas tem-se 2 studs Ø25 a cada 50cm. Os enrijecedores também são espaçados com múltiplos de 25cm (100, 150, 200 e 250cm). Na direção transversal as malhas foram divididas em um número suficiente para alinhar os extremos e as posições dos diferentes elementos conectados. Para tal a malha da laje nas bordas tem dimensões maiores, porém junto aos conectores a malha é refinada. A laje de concreto armado é modelada com 10 camadas de concreto e 4 camadas de armadura distribuída.

Os carregamentos dos modelos de análise são os pesos próprios dos elementos estruturais e as cargas móveis. As cargas permanentes são modeladas com uma carga equivalente de pressão atuando sobre a laje de concreto e dividida pela largura colaborante da laje de concreto.

Para o caso de cargas móveis, o VIMIS, não possui a implementação automatizada para o cálculo dos esforços em cada seção. Com isso optou-se por modelar a carga do trem tipo e de multidão da NBR 7188 (2013) como cargas estáticas equivalentes nodais e distribuídas, respectivamente. As cargas nodais representam o peso próprio do veículo dividido por cada roda. A carga distribuída representa a carga de multidão prevista na referida norma. Para cada viga mista analisada utilizou-se o trem tipo definido na abordagem analítica. Posicionou-se, após prévia análise, o veículo de referência nas posições mais desfavoráveis para cada viga de aço. Os valores das cargas móveis são inseridos no modelo com a majoração dos coeficientes de impacto vertical e o coeficiente do número de faixas calculados conforme critérios da NBR 7188 (2013).

Os carregamentos são aplicados em etapas diferentes. Aos 30 dias a carga permanente é totalmente aplicada sobre a estrutura. A liberação da obra ao tráfego ocorre 30 dias após a finalização da concretagem da capa, tempo necessário para acabamentos, desmobilização e remoção de canteiro, o que representa o tempo total de 60 dias.

As propriedades dos materiais empregados nos modelos numéricos: aço das vigas, aço passivo da laje, concreto da laje e conectores de cisalhamento devem ser informadas. As vigas de aço são elementos soldados com espessuras variáveis, que são modeladas com uma área equivalente mantendo fixa sempre a largura da peça e adotando assim uma espessura equivalente. Os elementos em aço existentes são considerados como aço

resistente à corrosão atmosférica. Para cada espessura de aço a entrada de dados requer a definição de uma propriedade diferente, representadas no GID por numerações.

A laje de concreto tem uma altura de 22cm e foi modelada com 10 camadas de 2,2cm. A resistência característica do concreto considerada, $f_{ck} = 30\text{MPa}$, é a mesma da abordagem analítica. A armadura passiva, CA-50, da laje é representada por uma camada de aço de espessura normalizada equivalente à área da armadura. O cálculo dessa espessura é feito conforme De Franco (2018). As camadas de armadura são posicionadas considerando que a laje varia entre os limites normalizados de -1 a 1, sendo 0 o eixo do elemento. Também deve ser informado o ângulo que a armadura faz com o eixo longitudinal do modelo, caracterizando armadura de reforço transversal ou longitudinal. A figura 7 ilustra as camadas para um modelo de laje de concreto discretizado em elementos finitos.

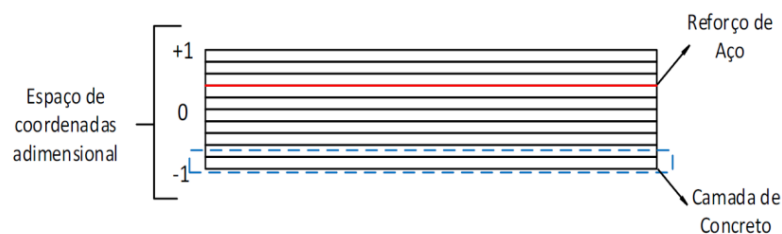


Figura 7 – Camadas da laje de concreto (fonte: WAYAR, 2016).

Os conectores de cisalhamento do tipo *stud bolt*, são modelados com diâmetro de $\varnothing=25\text{mm}$ e altura igual a diferença entre os planos médios da laje de concreto e da aba superior das vigas de aço. Este elemento tem a função de resistir ao cisalhamento horizontal no sentido longitudinal e transversal. A figura 8 ilustra o modelo adotado.

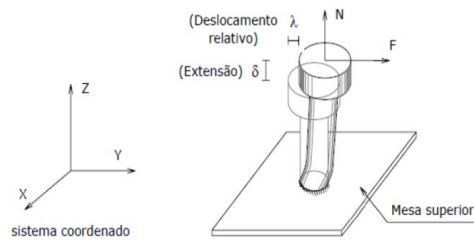


Figura 8 – Conector de cisalhamento (fonte: TAMAYO, 2011).

Para o desenvolvimento dos modelos, o valor adotado para as tensões de escoamento, módulo de elasticidade longitudinal, tensão de ruptura, Poisson, deformações limites, resistência a compressão e a tração do concreto são apresentados na Tabela 6. Para o modelo numérico correspondente ao ELU, as propriedades são divididas pelos seus respectivos coeficientes de minoração conforme as recomendações da NBR 8800 e NBR 8681.

Material	Propriedades		ELS	Coef. Norma	ELU	Unidades
Aço Estrutural (Perfil)	Módulo de Elasticidade	$E =$	2,00E+08			kN/m ²
	Tensão de Escoamento	$f_y =$	2,90E+05	1,10E+00	2,64E+05	kN/m ²
	Tensão de Ruptura	$f_u =$	4,35E+05	1,35E+00	3,22E+05	kN/m ²
	Poisson	$\nu =$	3,00E-01			
	Deformação Última	$\varepsilon_u =$	2,18E-03			%
Aço armadura passiva CA 50	Módulo de Elasticidade	$E =$	2,00E+08			kN/m ²
	Módulo de Elasticidade	$E' =$	2,00E+06			kN/m ²
	Tensão de Escoamento	$f_y =$	5,00E+05	1,15E+00	4,35E+05	kN/m ²
	Tensão de Ruptura	$f_u =$	5,40E+05	1,15E+00	4,70E+05	kN/m ²
	Poisson	$\nu =$	3,00E-01			
Concreto	Resistência à Compressão	$f_{ck} =$	3,00E+04	1,40E+00	2,14E+04	kN/m ²
	Módulo de Elasticidade Tangente	$E_{ct} =$	3,07E+07			kN/m ²
	Módulo de Elasticidade Secante	$E_{cs} =$	2,61E+07			kN/m ²
	Resistência à Tração	$f_{ctk,inf} =$	2,02E+03	1,40E+00	1,44E+03	kN/m ²
	Poisson	$\nu =$	2,00E-01			
	Deformação Última (Encurtamento)	$\varepsilon_{cu} =$	3,50E-03			
Deformação Última (Tração)	$\varepsilon_{ct} =$	1,50E-04				
Conector (Stud)	Diâmetro x Altura	$d \times h$	25 x 177			mm
	Poisson	$\nu =$	3,00E-01			
	Tensão de Ruptura	$f_u =$	4,15E+05	1,25E+00	3,32E+05	kN/m ²

Tabela 6 – Resumo das propriedades dos materiais

As cargas são divididas em peso próprio dos elementos de aço e concreto “g”, cargas de multidão “q” e as cargas do veículo tipo “Q”, previstas pela NBR 7188 (2013). Os carregamentos móveis já estão fatorados pelo coeficiente de impacto vertical. Para a combinação de ELU os fatores de majoração das cargas móveis são $\gamma_g = 1,35$ e $\gamma_q = 1,50$, conforme a NBR 8681 (2004). A tabela 7 apresenta o resumo dos carregamentos considerados nas verificações do estado limite último e estado limite de serviço.

VIGA	bfc (m)	g (kN/m)	q (kN/m)	ELS		ELU	
				(g+q) _k	Q (kN)	(g+q) _d	Q _d
VA11 = VA61	2,07	22,86	16,67	19,10	72,80	26,99	109,20
VA12 = VA62	2,50	31,72	11,40	17,25	53,70	23,97	80,55
VA13 = VA63	2,50	31,72	13,68	18,16	34,90	25,34	52,35
VA14 = VA64	2,50	20,29	13,08	13,35	32,50	18,80	48,75
VA15 = VA65	2,50	24,62	12,92	15,02	46,70	21,05	70,05
VA16 = VA66	2,23	18,19	14,61	14,71	60,90	20,84	91,35
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	2,07	23,62	16,67	19,46	72,80	27,48	109,20
VA22 = VA32	2,50	32,35	11,40	17,50	53,70	24,31	80,55
VA23 = VA33	2,50	32,35	13,68	18,41	34,90	25,68	52,35
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	2,50	21,02	13,08	13,64	32,50	19,20	48,75
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	2,50	25,35	12,92	15,31	46,70	21,44	70,05
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	2,23	18,92	14,61	15,04	60,90	21,28	91,35
VA42 = VA52	2,50	32,79	11,40	17,68	53,70	24,55	80,55
VA43 = VA53	2,50	32,79	13,68	18,59	34,90	25,91	52,35
				[kN/m ²]	kN	[kN/m ²]	kN

Tabela 7 – Resumo dos carregamentos para cada viga

5 Resultados das análises numéricas

Os resultados de tensões são apresentados para os casos de carga do veículo no centro do vão. As tensões normais na seção mista são apresentadas na mesa inferior da viga de aço (σ_{au}), na mesa superior da viga de aço (σ_{ao}), na mesa superior do reforço de aço (σ_{aro}) e na borda superior da mesa de concreto (σ_{co}). A figura 9 ilustra os pontos de controle das tensões normais.



Figura 9 – Pontos de controle das Tensões normais.

A verificação do estado limite último foi feita a partir de dois modelos de elementos finitos. O primeiro modelo considera um comportamento linear elástico para todos materiais (ELU-LN). Este modelo avalia o comportamento das vigas mistas considerando carregamentos majorados e as resistências minoradas pelos coeficientes normativos. Estes resultados fornecem um parâmetro de comparação com a abordagem analítica embasada pelos critérios da NBR 16694 (2020). A figura 10 apresenta a distribuição de tensões normais para a viga VA11. O resumo de tensões máximas atuantes ao meio do vão para todas as vigas de aço está apresentado na tabela 8.

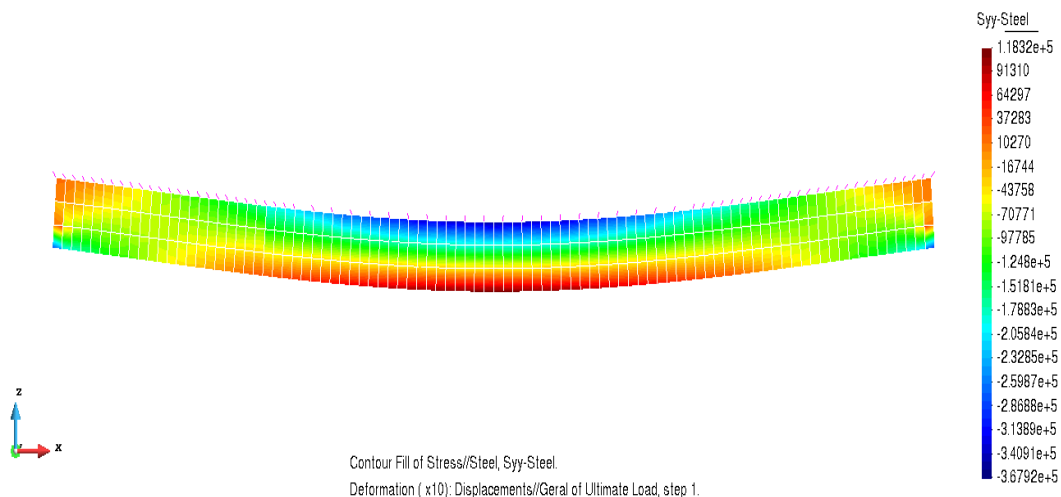


Figura 10 – Tensões normais ELU-LN no perfil de aço (max. Flexão) – VA11 (kN/m²)

VIGA	ELU			
	σ_{au}	σ_{ao}	σ_{aro}	σ_{co}
VA11 = VA61	9,90E+04	-2,02E+05	-	-1,12E+04
VA12 = VA62	1,07E+05	-	-2,78E+05	-8,91E+03
VA13 = VA63	1,11E+05	-	-2,32E+05	-7,74E+03
VA14 = VA64	8,77E+04	-2,67E+05	-	-6,03E+03
VA15 = VA65	8,18E+04	-2,27E+05	-	-7,43E+03
VA16 = VA66	1,07E+05	-2,26E+05	-	-8,19E+03
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	9,89E+04	-2,24E+05	-	-9,29E+03
VA22 = VA32	9,93E+04	-3,01E+05	-	-8,36E+03
VA23 = VA33	9,45E+04	-2,98E+05	-	-7,54E+03
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	7,37E+04	-1,60E+05	-	-6,02E+03
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	8,73E+04	-2,71E+05	-	-7,33E+03
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	8,68E+04	-2,66E+05	-	-8,07E+03
VA42 = VA52	9,89E+04	-	-2,87E+05	-8,94E+03
VA43 = VA53	9,45E+04	-	-2,65E+05	-7,90E+03
	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²

Tabela 8 – Resumo das tensões ELU – Linear Elástica

Já o segundo modelo considera uma análise não linear (ELU-NL), onde as cargas foram divididas em 10 incrementos, com critério de convergência em norma de forças igual a 0,1% por passo de carga. Os resultados de tensões são apresentados para os casos de carga do veículo no centro do vão. A figura 11 apresenta a distribuição de tensões normais para a viga VA11. O resumo de tensões para todas as vigas de aço está apresentado na tabela 9.

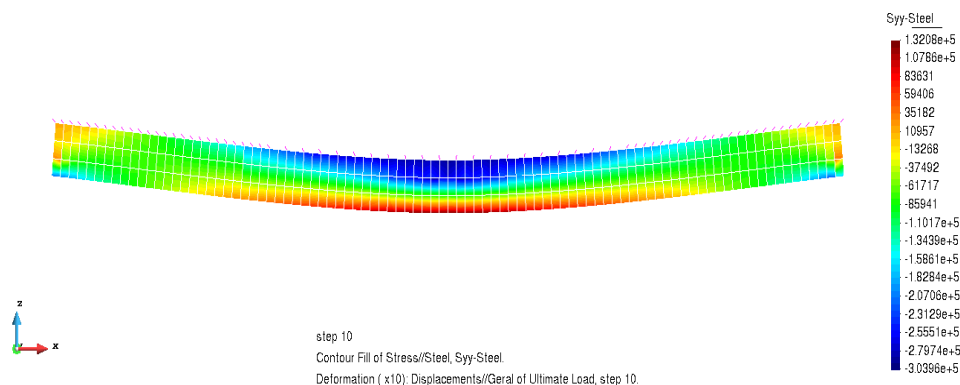


Figura 11 – Tensões normais ELU-NL no perfil de aço (max. Flexão) – VA11 [kN/m²]

VIGA	ELU - NÃO LINEAR			
	σ_{au}	σ_{ao}	σ_{aro}	σ_{co}
VA11 = VA61	1,32E+05	-3,10E+05	-	-1,39E+04
VA12 = VA62	1,33E+05	-	-3,07E+05	-1,01E+04
VA13 = VA63	1,21E+05	-	-3,07E+05	-8,71E+03
VA14 = VA64	8,82E+04	-2,59E+05	-	-6,60E+03
VA15 = VA65	1,07E+05	-2,98E+05	-	-2,20E+03
VA16 = VA66	1,08E+05	-2,98E+05	-	-9,12E+03
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	1,16E+05	-3,01E+05	-	-8,89E+03
VA22 = VA32	1,19E+05	-3,02E+05	-	-8,38E+03
VA23 = VA33	1,12E+05	-3,00E+05	-	-7,59E+03
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	8,42E+04	-2,55E+05	-	-5,99E+03
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	9,99E+04	-2,97E+05	-	-7,17E+03
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	9,90E+04	-2,94E+05	-	-7,78E+03
VA42 = VA52	2,38E+05	-	-3,07E+05	-9,02E+03
VA43 = VA53	2,55E+05	-	-3,07E+05	-7,87E+03
	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²

Tabela 9 – Resumo das tensões ELU – Não-Linear Elástica

6 Resultados das deformações

Um dos objetivos deste trabalho é obter os deslocamentos das vigas mistas para os carregamentos atuantes. Para a abordagem analítica foram modeladas as vigas mistas no software STRAP, considerando as fases construtivas, aplicando os carregamentos em cada fase e obtendo as flechas imediatas e finais da estrutura.

Na abordagem numérica feita com VIMIS foram desenvolvidas duas análises em separado baseado no MEF. A primeira abordagem considera os efeitos de fluência e retração com o comportamento elástico linear. Na segunda abordagem foram considerados o comportamento não-linear para as relações constitutivas dos materiais, bem como os efeitos de fluência e retração. Neste modelo as cargas são aplicadas em idades diferentes sobre a viga mista. Aos 30 dias toda a carga permanente é aplicada e aos 60 dias a carga móvel é aplicada. Conforme Hoss (2020), o modelo de fluência e retração adotado é o modelo do CEB90 para as duas abordagens. A tabela 10 compara os resultados obtidos para cada análise.

	A.A.-E.L.	L.E.+F.R.	N.L.+T.A.+F.R.
VIGA	δ_v	δ_v	δ_v
VA11 = VA61	5,62E+00	5,68E+00	6,49E+00
VA12 = VA62	6,61E+00	7,87E+00	9,57E+00
VA13 = VA63	5,51E+00	5,04E+00	5,71E+00
VA14 = VA64	4,93E+00	6,52E+00	7,87E+00
VA15 = VA65	5,47E+00	4,92E+00	5,69E+00
VA16 = VA66	5,10E+00	4,83E+00	5,53E+00
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	7,96E+00	6,91E+00	7,58E+00
VA22 = VA32	1,04E+01	7,50E+00	8,37E+00
VA23 = VA33	1,06E+01	7,39E+00	8,26E+00
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	6,95E+00	5,85E+00	6,46E+00
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	7,65E+00	6,77E+00	7,51E+00
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	7,05E+00	6,43E+00	7,11E+00
VA42 = VA52	7,43E+00	7,22E+00	7,98E+00
VA43 = VA53	7,37E+00	7,11E+00	7,85E+00
	[cm]	[cm]	[cm]

A.A. - Abordagem Analítica

L.E.+F.R. - Linear Elástico com Fluência e Retração

N.L.+T.A.+F.R. - Não Linear com Análise no Tempo considerando Fluência e Retração

Tabela 10 – Deformações máximas ELS

Com relação aos resultados de deformações obtidos nos diferentes modelos de análise, cabe destacar que os valores do modelo numérico, não-linear, considerando os efeitos de fluência e retração são, em geral, maiores que os obtidos pela abordagem analítica embasada pelos critérios normativos, para a grande maioria das vigas mistas. Conforme Fu e Lu (2003), os deslocamentos obtidos por modelos de elementos finitos com abordagem não-linear, fornecem valores maiores que os deslocamentos obtidos pela análise prática de projeto embasados na metodologia da transformação da área pela relação modular, devendo ser questionado se os valores recomendados pelas referidas normas para a relação modular “ n ” são suficientes e adequados para computar os efeitos diferidos de maneira coerente.

Uma explicação para os casos em que os valores de deformação obtidos pela abordagem analítica superam os valores obtidos pelos modelos em MEF é o fato da consideração das fases construtivas. Os modelos baseados no MEF ainda não contemplam estas fases e ao se analisar o modelo de barras elaborado no *software* STRAP, a maior contribuição

da deformação é gerada quando o perfil é carregado com as lajes pré-fabricadas e não trabalhando como uma seção mista. Os deslocamentos correspondentes a cada caso de carga são apresentados na figura abaixo para os nós próximos ao meio do vão 115 (primeiro vão) e 135 (segundo vão). A figura 12 apresenta os resultados em deslocamentos para ambos os nós, onde X2 é o deslocamento vertical e X6 representa o deslocamento a rotação do nó em questão.

Nó	Carreg.	X1	X2	X6
115	1	0.0000000	-0.0045302	-0.0000012
	2	0.0000000	-0.0465645	-0.0000120
	3	0.0000000	-0.0019200	-0.0000400
	4	0.0000000	0.0008364	0.0001353
	5	0.0000000	-0.0121222	-0.0001450

Nó	Carreg.	X1	X2	X6
135	1	0.0000000	-0.0088841	0.0000000
	2	0.0000000	-0.0725774	0.0000000
	3	0.0000000	-0.0051071	-0.0000001
	4	0.0000000	0.0000608	0.0001388
	5	0.0000000	-0.0165132	-0.0001391

Figura 12 – Deslocamentos parciais por carregamento (m).

7 Considerações finais

A infraestrutura brasileira enfrenta a mesma realidade observada em todo mundo, que é de reabilitar obras de arte especiais. A publicação da NBR 16694 (2020), que aborda o projeto de pontes mistas de aço e concreto, representa um marco de avanço da engenharia nacional e sinaliza a relevância que esse tipo de estrutura tem no cenário nacional.

Seja no projeto de uma ponte nova ou no de uma reabilitação, análises estruturais com base em modelos de elementos finitos são cada vez mais usuais. Nesse contexto, este trabalho investiga a aplicabilidade de um projeto baseado em modelos numéricos. Para tal se apresenta um estudo de caso do projeto de readequação e reforço da ponte em estruturas mistas sobre o rio Arataú na BR230/PA. Neste estudo são comparadas uma abordagem analítica usual e outra baseada em modelos de elementos finitos.

As conclusões aqui apresentadas têm algumas limitações. Cabe destacar que não foi considerada uma análise numérica de um tabuleiro completo da ponte, ou seja, foram

empregados modelos de distribuição transversal de carga. A priori se perde uma vantagem do modelo numérico que é fazer uma distribuição mais realística da carga. Outra limitação é a adoção da largura colaborante para o modelo numérico das vigas mistas em elementos finitos.

Na abordagem analítica foram verificadas as fases construtivas e de uso da ponte considerando os carregamentos e seções resistentes correspondentes. As respostas obtidas em momentos resistentes possibilitam a verificação direta da segurança estrutural ao se comparar com os momentos atuantes para as combinações de cálculo. Por se tratarem de vigas semi-compactas, as tensões para as combinações de ELU, são calculadas com distribuição de tensões em regime elástico (NBR 8800, 2008).

Ao se comparar as tensões apresentadas na tabela 10, as quais foram obtidas pelas duas abordagens de análise, nota-se que os modelos em elementos finitos apresentam tensões atuantes menores que os valores encontrados na abordagem analítica. Uma possível justificativa é fato do VIMIS não levar em conta as fases construtivas e com isso a seção resistente para os carregamentos é sempre a seção mista completa.

Nas análises de tensões atuantes para as combinações de ELU, os valores se encontram dentro dos limites admissíveis indicados pelas normas. Na abordagem analítica, as tensões de tração na mesa inferior da viga mista, para as vigas VA22 a VA24, VA32 a VA34, VA44 a VA46 e VA54 a VA56, superam a tensão de escoamento. Porém, nos modelos em elementos finitos, estas vigas apresentam tensões menores que os limites estabelecidos. Com isso conclui-se que as vigas possuem capacidade portante para as solicitações de cálculo. Caso não se possua os resultados dos modelos em elementos finitos se faz necessário uma nova análise dos modelos analíticos destas vigas mistas.

VIGA	Analítica		ELU - Linear Elástica		ELU - Não Linear	
	σ_{au}	σ_{co}	σ_{au}	σ_{co}	σ_{au}	σ_{co}
VA11 = VA61	2,45E+05	-8,57E+03	9,90E+04	-1,12E+04	1,32E+05	-1,39E+04
VA12 = VA62	2,51E+05	-4,97E+03	1,07E+05	-8,91E+03	1,33E+05	-1,01E+04
VA13 = VA63	2,51E+05	-4,97E+03	1,11E+05	-7,74E+03	1,21E+05	-8,71E+03
VA14 = VA64	2,38E+05	-5,86E+03	8,77E+04	-6,03E+03	8,82E+04	-6,60E+03
VA15 = VA65	2,38E+05	-5,86E+03	8,18E+04	-7,43E+03	1,07E+05	-2,20E+03
VA16 = VA66	2,33E+05	-6,71E+03	1,07E+05	-8,19E+03	1,08E+05	-9,12E+03
VA21 = VA31 = VA41 = VA51	2,44E+05	-9,34E+03	9,89E+04	-9,29E+03	1,16E+05	-8,89E+03
VA22 = VA32	2,67E+05	-5,90E+03	9,93E+04	-8,36E+03	1,19E+05	-8,38E+03
VA23 = VA33	2,67E+05	-5,90E+03	9,45E+04	-7,54E+03	1,12E+05	-7,59E+03
VA24 = VA34 = VA44 = VA54	2,67E+05	-5,90E+03	7,37E+04	-6,02E+03	8,42E+04	-5,99E+03
VA25 = VA35 = VA45 = VA55	2,67E+05	-5,90E+03	8,73E+04	-7,33E+03	9,99E+04	-7,17E+03
VA26 = VA36 = VA46 = VA56	2,16E+05	-7,33E+03	8,68E+04	-8,07E+03	9,90E+04	-7,78E+03
VA42 = VA52	2,19E+05	-5,20E+03	9,89E+04	-8,94E+03	2,38E+05	-9,02E+03
VA43 = VA53	2,19E+05	-5,20E+03	9,45E+04	-7,90E+03	2,55E+05	-7,87E+03
	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²
Tensões Limites - f _{yd}	Aço	2,64E+05	Concreto	-2,14E+04		

Tabela 10 –Tensões ELU [kN/m²]

A aplicação da abordagem apresentada na NBR 16694 (2020), para o projeto de pontes mistas, forneceu valores de tensões adequadas quando comparados com os resultados obtidos nos modelos de elementos finitos. Apesar de o código de análise estrutural VIMIS não possuir a capacidade de análise das fases construtivas, os resultados obtidos são satisfatórios, pois é possível observar a capacidade portante dos elementos mistos frente as cargas atuantes e entender melhor o comportamento dos elementos do projeto.

O anexo C da NBR 16694 (2020) indica as limitações de deslocamentos para os diferentes casos de pontes. Para o caso da ponte Arataú, esse limite é dado pela relação $L/800$. Para os dois vãos extremos, as flechas máximas permitidas são 2,83cm e para os vãos intermediários o valor limite é 3,75cm. Pela tabela de deformações apresentadas é possível observar que os valores são superiores aos limites da NBR 16694.

O desenvolvimento de uma abordagem analítica é de expedita implementação e fornece velocidade de análise ao engenheiro de estruturas. Porém, é preciso ter nítida ciência

das limitações e simplificações que se encontram embutidas nas recomendações normativas para que o projeto antecipe da melhor forma o comportamento global da estrutura. O uso de uma abordagem numérica, em paralelo, fornece um balizador para o melhor entendimento do comportamento da estrutura. Porém, o engenheiro necessita de uma formação teórica adequada para o correto uso de um sistema de elementos finitos.

Os modelos numéricos apresentam vantagens em relação à abordagem analítica e contribuem para um projeto mais completo. A análise de vigas mistas isoladas via MEF é de acessível implementação desde que o engenheiro tenha a formação necessária. No entanto modelos numéricos de uma ponte completa podem exigir um grande número de nós e elementos, aumentando de modo significativo os recursos computacionais necessários, o que pode tornar a aplicabilidade prática destes modelos limitada.

A abordagem numérica considerada é limitada à verificação da capacidade portante das vigas mistas para os carregamentos normativos. Os fatores de majoração são aplicados sobre as cargas atuantes e os coeficientes de minoração são aplicados sobre as propriedades dos materiais. Com isso, verifica-se a capacidade portante dos elementos com mesmas condições da abordagem analítica. Os modelos numéricos não foram levados à ruptura por se tratarem de vigas mistas semi-compactas, sujeitas a flambagem local, no entanto esse procedimento pode ser conservativo.

Em termos de análise de tensões ambas as abordagens comprovaram a capacidade portante das estruturas. Em termos de deslocamentos fica claro que o método de relação modular embutido na NBR 16694 (2020) possui limitações na previsibilidade das flechas finais. Porém é necessário ressaltar que a publicação do código brasileiro de pontes em estruturas mistas contribui diretamente com a difusão de novos projetos,

manutenção das obras de arte existentes em estruturas mistas e o desenvolvimento técnico da engenharia nacional.

Considerando a popularização dos programas de análise em elementos finitos, conclui-se, que o projeto analítico, embasado nas recomendações normativas, carece de uma complementação da análise, via modelos numéricos em elementos finitos. A abordagem de elementos finitos pode ser considerada necessária para o correto entendimento da estrutura, porém, não obrigatória.

7. Referências

ALMEIDA, V. de S. **Influência da distribuição transversal de cargas no projeto de vigas protendidas de pontes**. Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **ASSHTO-LRFD: Bridge Design Specifications**. Washington, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: ações e segurança nas estruturas – procedimento**. Rio de Janeiro, 2003, revisão 2004.

_____. **NBR 8800: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 7188: Cargamóvel de pontes rodoviárias e passarela de pedestres**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 16694: Projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas de aço e concreto**. Rio de Janeiro, 2020.

BARRA, B. Q.; PALHARES, R. A.; BRISOLA, G. M. S. Dimensionamento de pontes rodoviárias mistas de aço e concreto de acordo com a NBR 16694:2020 **Anais do Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas -CBPE**. 2021.

CARVALHO, D. M.; CALIXTO J. M. F. Analysis of strengthening procedures of reinforced concrete highway bridges: a brazilian case study. **IBRACON Structures and Materials Journal**. v. 12, 199-209, 2019.

DE FRANCO. M. I. E. **Análise numérica de vigas mistas aço-concreto com protensão aderente e não aderente pelo método dos elementos finitos**. 2018. 177 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

DIAS, M. M. **Análise numérica de vigas mistas aço-concreto pelo método dos elementos finitos**: efeitos de longa duração. 2013. 177 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 4** – design of composite steel and concrete structures – part 2: general rules and rules for bridges. Brussels, 2005.

FU, K. C., LU, F. Nonlinear finite-element analysis for highway bridge superstructures. **Journal of Bridge Engineering**. p.173-179, June 2003

HOSS, C. **Estudo de caso da ponte em estruturas mistas sobre o rio Arataú na BR-230/PA**. 2020, 223 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020 (em publicação).

LEBET, J. P., HIRT, M. A., **Steel Bridges: conceptual and structural design of steel and steel-concrete composite bridges**. EPL Press, 2013.

MORENO, J. C. A. **Análise numérica de vigas mistas aço-concreto pelo método dos elementos finitos**: modelos para os efeitos de longa duração e protensão interna. 2016. 181 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

NAKAMURA, S.; COLLIN, P. Steel Concrete Composite Structures (Part II): Introduction. **Structural Engineering International**: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Zurich, v. 20, n. 2, p. 126, May 2010.

REGINATO, L. H. **Estudo da largura efetiva de vigas mistas de aço-concreto em carregamentos de serviço**: método dos elementos finitos versus código de projeto. 2017. 129 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SANCHES, B. S. **Implementação de análise não linear geométrica em programa de vigas mistas**. 2020. 182 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

TAMAYO, J. L. P. **Análise numérica de vigas mistas pelo método dos elementos finitos**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

WAYAR, A. M. M. **Análise numérica de vigas mistas aço-concreto pelo método dos elementos finitos**: protensão externa. 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

CASE STUDY OF THE COMPOSITE BRIDGE OVER THE ARATAÚ AT BR 230/PA

Abstract: Composite Bridges are built with great recurrence in the national and world scenario. Brazil faces an aging reality of the structures that make up its infrastructure, including bridges, which need immediate rehabilitation and readjustment. Until recently, these projects were based on the NBR 8800 standard. However, this context was changed by the launch of NBR 16694 in 2020, which centralizes the concepts and procedures for the analytical dimensioning of mixed bridges. Whether designing a new bridge or a rehabilitation project, analyzes through numerical models using the finite element method (FEM) are increasingly common. Therefore, a question that arises is whether finite element analysis is only complementary or can it replace the analytical approach? In order to answer this question, this paper presents a case study of the project for the adaptation and reinforcement of the bridge in mixed structures over the Arataú River on BR230/PA. The results obtained show that the model with frame bars associated with an analytical approach with normative criteria has limitations regarding the prediction of displacements and stresses for this type of structure.

Key-words: pontes mistas de aço-concreto, elementos finitos, reforço, reabilitação.