



Análise e Avaliação de Integridade do Viaduto da Mutuquinha: Metodologias de Inspeção e Cálculo Estrutural

**Raphael Pedrosa Heleno¹, Bruno Marani Siciliano², Rodrigo Nogueira Vigiani Roland e Silva³,
Rafhaela Taise Pedrosa Simões⁴**

^{1,2,3,4} VALE S/A / Coordenação de Integridade Estrutural / Gerência de Engenharia de Usina Sul

¹raphael.heleno@vale.com, ²bruno.marani@vale.com, ³rodrigo.roland@vale.com, ⁴rafaela.simoes@vale.com

Resumo

Este trabalho apresenta a análise estrutural do viaduto da Mutuquinha, localizado na Mina da Mutuca - Vale, enfatizando metodologias de levantamento de campo por escaneamento 3D, com construção da nuvem de pontos e inspeções realizadas para garantir a integridade estrutural do ativo. As informações de verificação estrutural foram obtidas utilizando ensaios de pacometria e extração de corpos de prova para determinação da resistência à compressão do concreto, bem como uma inspeção visual foi realizada para identificação de anomalias, que foram cadastradas conforme a ABNT NBR 9452 (2019). Os dados coletados foram integrados a um modelo numérico, desenvolvido no *software* SAP 2000 v.16 para simulação das condições reais da estrutura e avaliação dos esforços solicitantes. As ações permanentes principais foram baseadas na ABNT NBR 7187 (2021) e na ABNT NBR 6120 (2019), ao passo que as cargas móveis foram obtidas a partir da ABNT NBR 7188 (2013). As combinações de carga especificadas foram baseadas nas normas ABNT NBR 8681 (2003). A interação solo-estrutura foi considerada no modelo a partir de coeficientes de mola relativos à rigidez do solo. Os esforços internos dos elementos estruturais (lajes, vigas e pilares) foram obtidos a partir de uma análise do tipo *moving load* e os seus dimensionamentos foram verificados a partir de diretrizes da ABNT NBR 6118 (2019). Os resultados indicaram que a estrutura, com a resistência característica corrigida para 36,5 MPa, foi considerada segura para as condições de carregamento previstas.

Palavras-chave

Análise Estrutural; Viaduto da Mutuquinha; Inspeção Visual; Pacometria; Ensaio de Resistência à Compressão Axial; Escaneamento 3D.

Introdução

A segurança e a durabilidade das estruturas de transporte são de suma importância na engenharia civil, especialmente em áreas onde o tráfego de veículos pesados é frequente. O viaduto da Mutuquinha, situado na Mina da Mutuca, enfrentou a necessidade de avaliação estrutural devido à decisão de substituir os guarda-corpos pré-moldados de concreto existentes por barreiras do tipo *New Jersey*. Essa mudança visa não apenas aumentar a segurança dos usuários, mas também proporcionar uma proteção mais eficaz contra possíveis acidentes, considerando as características específicas de carga e impacto associadas a esse tipo de barreira.

A avaliação estrutural, portanto, torna-se imprescindível para garantir que a estrutura do viaduto possa suportar as novas exigências impostas pela instalação das barreiras. Esse processo envolve a análise estrutural e verificação das vigas, pilares e lajes, a fim de assegurar que todos os elementos da estrutura atendam aos padrões de segurança exigidos pelas normas vigentes. Além disso, a avaliação busca identificar possíveis anomalias que possam comprometer a funcionalidade e a durabilidade do viaduto em longo prazo. Contudo, a ausência de projetos desse viaduto representa um obstáculo para o desenvolvimento dessa avaliação estrutural.

Neste contexto, o presente artigo apresenta uma análise detalhada da avaliação estrutural do viaduto da Mutuquinha, destacando os métodos utilizados para levantamento geométrico, os resultados obtidos em ensaios e as recomendações para intervenções futuras. A importância dessa avaliação vai além da substituição

dos guarda corpos, refletindo um compromisso com a segurança e a qualidade das infraestruturas de transporte, que são fundamentais para a operação eficiente das atividades mineradoras e para a segurança dos usuários.

Revisão Bibliográfica

O escaneamento 3D tem se consolidado como uma ferramenta fundamental na engenharia civil e na arquitetura, permitindo a captura precisa de informações espaciais e a criação de modelos tridimensionais detalhados. O escaneamento a laser, em particular, destaca-se pela sua capacidade de gerar nuvens de pontos com alta densidade de informações geométricas precisas, essenciais para a análise e avaliação de estruturas.

Escaneamento a Laser

O escaneamento a laser é uma técnica que utiliza um dispositivo laser scanner para capturar a geometria de um objeto ou de uma cena. O princípio fundamental dessa tecnologia baseia-se na emissão de pulsos de laser que são refletidos pelos objetos nas proximidades e retornam ao scanner. A partir desse retorno, o dispositivo calcula a distância entre o scanner e o objeto, criando uma nuvem de pontos que representa a superfície do objeto em um espaço tridimensional. De acordo com Zhang (2021), a precisão e a rapidez do escaneamento a laser terrestre e estacionário o tornam ideal para aplicações em geometrias complexas, onde métodos tradicionais de medição podem ser inviáveis. Isso permite que medidas sejam levantadas a distâncias de até 70 m sem a necessidade de montagem de andaimes.

Tratamento de Nuvem de Pontos

Após a captura, a nuvem de pontos gerada deve ser processada e tratada para ser utilizada na modelagem. O tratamento envolve técnicas de registro das cenas, remoção de ruídos e redundâncias e informações desnecessárias e conversão para formatos de modelagem mais utilizáveis, como malhas ou pontos, conforme definido por Bu (2008). *Softwares* como o Autodesk ReCap e o CloudCompare são frequentemente utilizadas para realizar essas operações, permitindo a conversão da nuvem de pontos em modelos digitais de pontos, utilizados como referência para modelagem 3D ou usados em programas de modelagem estrutural.

Ensaio de Compressão Axial do Concreto

A extração de corpos de prova de concreto é um procedimento fundamental para a avaliação da qualidade e resistência das estruturas de concreto. A norma ABNT NBR 7680 (2015), que estabelece diretrizes para a extração e moldagem de corpos de prova, é essencial para garantir a confiabilidade dos resultados dos ensaios de resistência à compressão. A ABNT NBR 7680 (2015) orienta sobre os métodos de extração, dimensões dos corpos de prova, cuidados a serem tomados durante a extração e o transporte dos testemunhos para o laboratório. A norma enfatiza que os corpos de prova devem ser extraídos de locais representativos, a fim de garantir que os resultados dos ensaios sejam representativos da estrutura como um todo. A norma recomenda a utilização de extratora provida de cálice e coroa diamantada, com refrigeração a água e baixa vibração para a produção de furos em estruturas de concreto, garantindo que as amostras sejam retiradas sem comprometer a integridade da estrutura ou danificar o testemunho. A mesma norma também destaca a quantidade mínima de amostras por lote, coeficientes de correção dos resultados do ensaio em função da dimensão do corpo de prova e afirma que a estimativa da resistência característica do lote para fins de verificação da segurança estrutural é dada pela média dos resultados individuais daquele lote. O ensaio laboratorial foi realizado em conformidade com a ABNT NBR 5739 (2018). Ainda para a garantia de uma segurança com nível de confiança de 95%, a resistência característica à compressão do lote ensaiado (f_{ck}) foi calculada segundo a ABNT NBR 12655:2006 pela equação abaixo:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 \cdot S_d \quad (1)$$

em que f_{cm} é a média dos valores de resistência das amostras e S_d é o desvio padrão desses valores.

Ensaio de Profundidade de Carbonatação

Segundo Helene (1986), a alcalinidade do concreto, que é resultante da presença de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), pode diminuir ao longo do tempo devido à ação do CO_2 presente na atmosfera, assim como de outros gases, como SO_2 e H_2S . O processo de carbonatação é um processo natural e acontece de maneira lenta, a sua velocidade é influenciada pela concentração de CO_2 no ambiente, além da qualidade do concreto, sua

permeabilidade, compacidade e a umidade relativa. De acordo com Aguiar (2010), o método mais comum para indicar mudanças de pH e avaliar a profundidade de carbonatação envolve o uso de soluções corantes, como a solução de fenolftaleína. Ao realizar o teste com fenolftaleína, as áreas mais alcalinas exibem uma coloração violeta, enquanto as regiões menos alcalinas aparecem incolores ou com uma coloração ligeiramente violeta.

Metodologia

O Viaduto da Mutuquinha é uma obra em concreto armado, cuja superestrutura é composta por 19 vãos contínuos em um trecho central com 15 vãos e dois trechos adjacentes de 2 vãos cada, totalizando 129,8 m de extensão. O tabuleiro com 8,5 m de largura apresenta duas pistas para o tráfego de veículos em sentidos contrários. Os trechos são separados por juntas de dilatação e as extremidades apoiadas sobre encontros leves. A mesoestrutura é conectada a superestrutura de forma monolítica e os pilares são conectados entre si por cintas de travamento a cada 6,2 m de altura em ambas as direções. As fundações são compostas por uma estaca por pilar. A Figura 1 apresenta uma foto da obra em questão com os guarda corpos em concreto armado, concebidos conforme projeto original.



Figura 1 – Viaduto da Mutuquinha em sua condição original do tabuleiro.

O projeto foi elaborado em 1952 e devido ao tempo decorrido desde sua construção, algumas informações do projeto original não estão completas ou disponíveis, o que dificulta a avaliação precisa da estrutura. Para superar essas limitações, foi decidido realizar um escaneamento 3D da edificação, permitindo a obtenção de dados geométricos e estruturais mais precisos. Tendo em vista a época em que o projeto foi concebido, o viaduto provavelmente foi dimensionado para o trem tipo TB-240 o que reforça a necessidade de reverificá-lo a luz das novas cargas rodoviárias normativas.

As armaduras do viaduto foram assumidas como aço CA-25, um material amplamente utilizado na construção civil na época de sua construção, o que orienta a análise das propriedades mecânicas e a avaliação da resistência da estrutura ao longo do tempo. As armaduras dos pilares apesar de indicadas em projeto foram reverificadas em campo.

Inicialmente, utilizando-se o scanner FARO Focus M 70, com resolução 1/3 e qualidade de captação 4x, o escaneamento 3D do viaduto foi executado em campo. As cenas capturadas foram unidas em um *software* próprio da fabricante do scanner e a nuvem de pontos foi tratada no Autodesk ReCap 2022. A partir da nuvem de pontos montada e tratada removendo ruídos e informações desnecessária, um modelo 3D do viaduto foi elaborado utilizando o programa SOLIDWORKS 2022, no qual todas as dimensões gerais do ativo e individuais de cada elemento estrutural foram modeladas.

Dada a falta de informações completas de projeto do viaduto, para a determinação da real distribuição de armaduras nos elementos estruturais, ensaios de pacometria foram realizados com escarificação do cobrimento dos elementos para medida direta do diâmetro das armaduras. Ainda, corpos de prova foram extraídos, a fim de se determinar a resistência atual do concreto, segundo prescrições da ABNT NBR 12655 (2015). Ensaios de frente de carbonatação foram performados para determinar-se a possível despassivação das armaduras. A seguir, é apresentada uma figura representativa dos ensaios realizados:



(a)



(b)

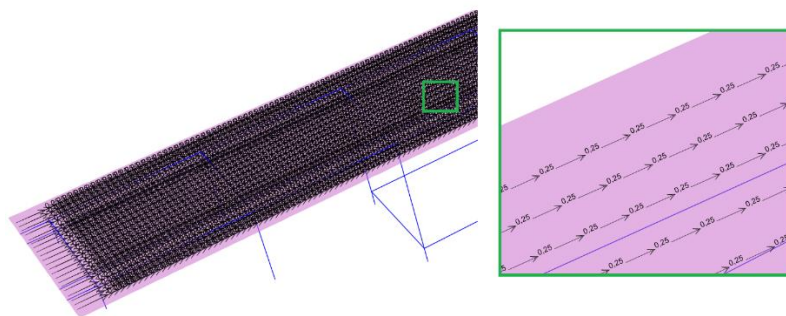


(c)

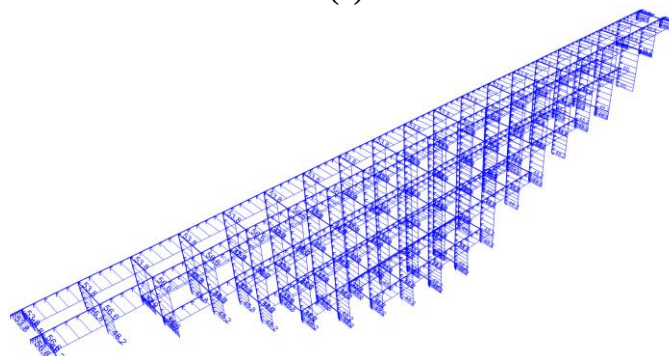
Figura 2 – Ensaio realizados. (a) pacometria; (b) extração de CPs; (c) frente de carbonatação.

Partindo-se do modelo 3D do viaduto, um modelo estrutural foi elaborado no SAP2000 v.16. Os pilares e vigas foram modelados considerando elementos finitos de barra, com 6 graus de liberdade (3 translacionais e 3 rotacionais), ao passo que a laje do tabuleiro foi modelada com elementos de casca fina, também com 6 graus de liberdade e considerando as deformações por cisalhamento e axiais. Em uma análise inicial com características de projeto, o concreto C20 e o aço CA-25 foram considerados a partir de documentos originais do ativo, ambos modelados como materiais perfeitamente elásticos. As vinculações externas semirrígidas relativas à interação solo-estrutura foram consideradas como coeficientes de mola, obtidos a partir da tensão admissível do solo, correlacionando-a com os coeficientes de recalque vertical e horizontal, segundo as prescrições de Morrison (1993) e com as dimensões das sapatas de fundação.

Foram consideradas as seguintes hipóteses de carregamento: peso próprio da estrutura, considerado a partir do peso específico dos materiais segundo a ABNT NBR 6120 (2019); cargas permanentes das defensas e do capeamento, conforme a ABNT NBR 7187 (2021); carga móvel do TB-450, segundo a ABNT NBR 7188 (2013); carga de frenagem, de acordo com a ABNT NBR 7188 (2013); cargas de vento, como preconizado pela ABNT NBR 6123 (1988); variação de temperatura uniforme ($\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$); gradiente térmico, visto que a altura das longarinas é significativa e parte delas é exposta diretamente ao sol ($16,67\text{ }^{\circ}\text{C/m}$). As combinações de ações últimas normais e frequentes de serviço foram consideradas segundo as prescrições da ABNT NBR 8681 (2003). Alguns exemplos dos carregamentos aplicados são apresentados a seguir na Figura 3:



(a)



(b)

Figura 3 – Carregamentos aplicados. (a) frenagem; (b) vento em elementos reticulados.

A partir de uma análise estática linear por linhas de influência (*moving load*), os esforços máximos e mínimos em cada elemento estrutural foram obtidos. Tais esforços foram utilizados para a verificação estrutural de cada tipo de elemento do viaduto. Foram desenvolvidas planilhas de cálculo para a verificação das vigas e da laje de concreto armado, ao passo que os pilares foram verificados utilizando-se o *software* P-Calc v1.4. Após a verificação da reprovação de alguns pilares do viaduto considerando a resistência original de projeto do concreto (20 MPa), uma nova análise considerando a resistência real (36,5 MPa) do concreto após a realização dos ensaios de compressão axial foi realizada. Os deslocamentos verticais das vigas e horizontais nos topos dos pilares foram avaliados e validados conforme critérios da ABNT NBR 6118 (2019).

Por fim, após a execução dos ensaios de campo e das inspeções visuais, o viaduto foi classificado conforme a ABNT NBR 9452 (2019), segundo parâmetros estruturais, funcionais e de durabilidade.

Resultados e Discussão

Escaneamento 3D e Modelagem Geométrica

Após o escaneamento 3D, a montagem/tratamento da nuvem de pontos e a modelagem geométrica do viaduto, a seguinte vista isométrica apresentada na Figura 4 foi obtida e representa a conclusão das etapas citadas:

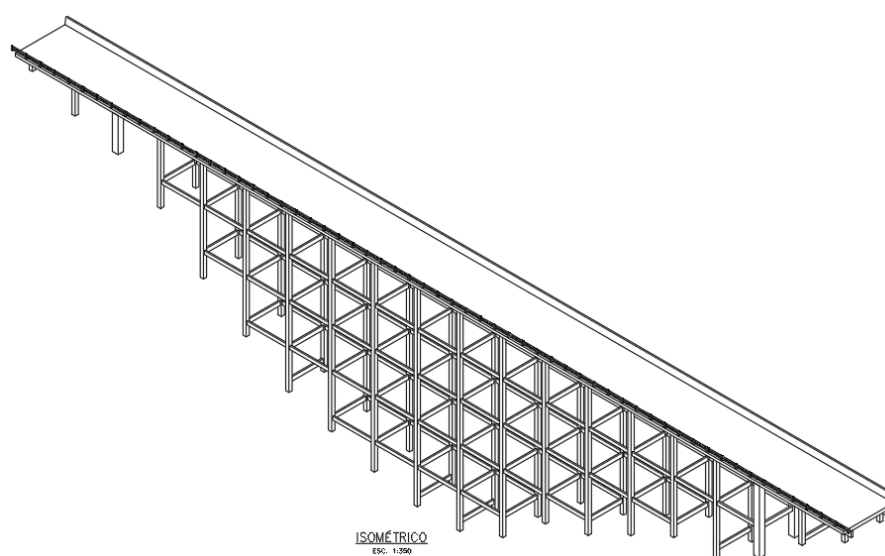


Figura 4 – Vista isométrica do viaduto.

Ensaio de Campo

A partir dos ensaios de pacometria nos pilares e da medida direta do diâmetro das armaduras após a escarificação de seus cobrimentos, constatou-se a presença de 16 Ø 10 mm (12,57 cm²), que difere da área de aço de projeto (14,72 cm²). Desta forma, a taxa real reduzida foi utilizada nas verificações estruturais dos pilares, indicando, assim, a importância da execução deste tipo de ensaio em estruturas antigas.

A partir da ruptura dos 4 CPs extraídos em ensaios de compressão axial, os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de compressão axial.

Corpo de Prova	Resistência à Compressão Final [MPa]	Resistência à Compressão Média (f_{cm}) [MPa]	Desvio padrão normativo (S_d) [MPa]	Resistência à Compressão Característica ($p = 95\%$) (f_{ck}) [MPa]
CP1	50,3	43,8	4,4	36,5
CP2	41,2			
CP3	42,5			
CP4	41,1			

Nota-se que a resistência característica do concreto em sua situação atual é de 36,5 MPa, valor este superior à sua resistência de projeto, de 20 MPa. Tal divergência pode ser explicado pelo ganho de resistência do

concreto ao longo do tempo. Tal resistência superior atualizada foi utilizada nas verificações estruturais dos elementos de concreto.

Após a realização dos ensaios de frente de carbonatação, foi possível observar que a carbonatação apresenta aproximadamente 10 mm de profundidade, considerando que haja mais 5 mm de carbonatação com pH acima de 9, e por isso, rosa, a passividade do concreto está garantida por 15 mm de frente em relação à superfície. Assim, as armaduras estão protegidas pelo fato de que o cobrimento dos elementos estruturais (40 mm) é superior a esta profundidade.

Análise Estrutural - ELU

A seguir, é apresentada uma vista geral do modelo estrutural em elementos elaborado para as análises do viaduto:

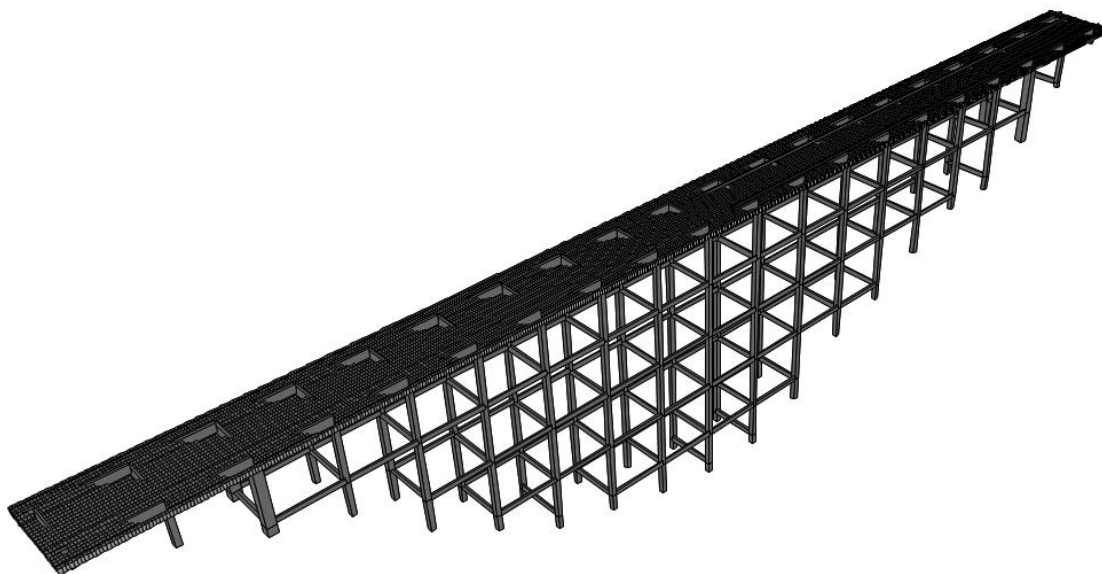


Figura 5 – Modelo estrutural em elementos finitos.

A análise estrutural inicial (com as propriedades de projeto dos materiais) foi realizada para a obtenção dos esforços solicitantes e os pilares P2 e P19 foram reprovados pela verificação de ELU do EN 1992-1-1(2004), conforme apresentado na Figura 6:

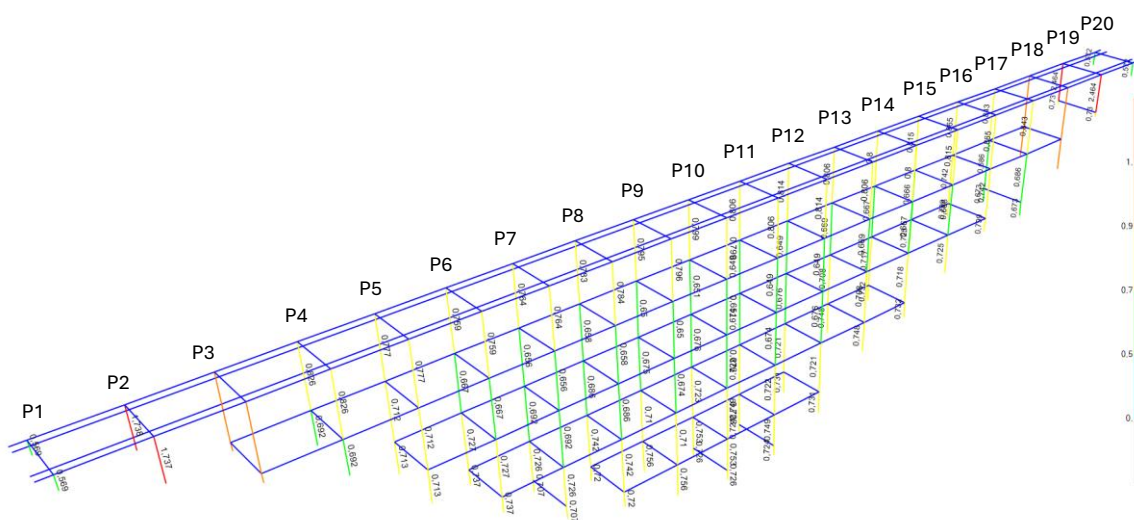


Figura 6 – Resultados em termos de IU dos pilares.

Todas as vigas e a laje do tabuleiro foram verificadas com planilhas de desenvolvimento próprio dos autores, sendo todas aprovadas para critérios de ELU, e alguns exemplos dos resultados são apresentados como segue:

Dados da laje					
Altura da laje		50	cm		
Cobrimento da armadura		5	cm		
Desenho de forma		1000MU-C-80150			
Armação em X					
Armadura inferior		Armadura superior			
Diâmetro	8	mm	Diâmetro	8	mm
Espaçamento	7,5	cm	Espaçamento	7,5	cm
Área de aço - A _{s,inf}	6,70	cm ² /m	Área de aço - A _{s,sup}	6,70	cm ² /m
Armação em Y					
Armadura inferior		Armadura superior			
Diâmetro	8	mm	Diâmetro	8	mm
Espaçamento	7,5	cm	Espaçamento	7,5	cm
Área de aço - A _{s,inf}	6,70	cm ² /m	Área de aço - A _{s,sup}	6,70	cm ² /m
Desenho de armação	HSPC6895				
Dados do material					
Concreto f _{ck}				20	MPa
Agregado				Granito e gnaiss	
Módulo de elasticidade do aço - E _s				21000	MPa
Resistência ao escoamento do aço - f _{yk}				500	MPa
Coefficiente de ponderação do concreto - γ _c				1,4	-
Coefficiente de ponderação do aço - γ _s				1,15	-
Resistência de cálculo do concreto - f _{cd}				1,43	Nlcm ²
Coefficiente - α _c				0,85	
Resistência à compressão do concreto - α _c f _{cd}				1,21	Nlcm ²
Coefficiente - α _s				1,00	-
Módulo de elasticidade tangente do concreto - E _{ci}				2504,40	Nlcm ²
Coefficiente - α _i				0,85	-
Módulo de elasticidade secante do concreto - E _{cs}				2128,74	Nlcm ²
Resistência à tração do concreto - f _{ctd}				0,11	Nlcm ²
Resistência de cálculo do aço - f _{td}				43,48	Nlcm ²
Esforços solicitantes					
Momento positivo em X - M _{xSd}				36,00	kN cm / cm
Momento positivo em Y - M _{ySd}				0,00	kN cm / cm
Momento negativo em X - X _{sSd}				120,00	kN cm / cm
Momento negativo em Y - Y _{sSd}				116,00	kN cm / cm
Esforço cortante em X - V _{sSd}				1,32	kN / cm
Esforço cortante em Y - V _{ySd}				1,52	kN / cm
Verificação do concreto ao cisalhamento					
Tensão cisalhante resistente de cálculo - τ _{Rd}				0,03	Nlcm ²
Força cisalhante resistente de cálculo em X - V _{Rd}				1,53	Nlcm
Força cisalhante resistente de cálculo em Y - V _{Rd}				1,53	Nlcm
Força cisalhante solicitante de cálculo em X - V _{sSd}				1,32	Nlcm
Força cisalhante solicitante de cálculo em Y - V _{ySd}				1,52	Nlcm
Verificação da cortante em X					OK
Verificação da cortante em Y					OK
Verificação das armaduras					
Armação em X					
Armadura inferior			Armadura superior		
Armadura existente - A _{s,inf}	6,70	cm ² /m	Armadura existente - A _{s,sup}	6,70	cm ² /m
Armadura calculada p/ M _x	0,00	cm ² /m	Armadura calculada p/ X _s	6,19	cm ² /m
Armadura calculada p/ 2M _x	0,00	cm ² /m	Armadura calculada p/ 2X _s	12,73	cm ² /m
Armadura mínima	5,00	cm ² /m	Armadura mínima	5,00	cm ² /m
Verificação	OK		Verificação		OK
Armação em Y					
Armadura inferior			Armadura superior		
Armadura existente - A _{s,inf}	6,70	cm ² /m	Armadura existente - A _{s,sup}	6,70	cm ² /m
Armadura calculada p/ M _y	1,99	cm ² /m	Armadura calculada p/ M _y	6,41	cm ² /m
Armadura calculada p/ 2M _y	3,81	cm ² /m	Armadura calculada p/ 2M _y	13,19	cm ² /m
Armadura mínima	5,00	cm ² /m	Armadura mínima	5,00	cm ² /m
Verificação	OK		Verificação		OK

(a)

Dados de Entrada:			
Dados da seção transversal:			
b =	25 cm	Cobrim. =	4 cm
h =	90 cm	d' =	5 cm
		d =	85 cm
		Área =	2250 cm ²
Armadura inferior		Armadura Superior	
Quantid. =	12	Quantid. =	2
Diâmetro =	16,0 mm	Diâmetro =	4,7 mm
A _{s,inf} utiliz. =	24,13 cm ²	A _{s,sup} utiliz. =	0,35 cm ²
Estribo		Armadura Lateral (por face)	
Diâmetro =	5,0 mm	Quantid. =	8,0
Espac. =	25,0 cm	Diâmetro =	6,4 mm
Nº ramos =	4 unid.	A _{sl} utiliz. =	2,53 cm ²
A _{st} utiliz. =	3,14 cm ² /m		
Dados dos materiais:			
f _{ck} =	20 MPa	f _{cd} =	1,43 kN/cm ²
f _{yk} =	250 MPa	f _{td} =	21,7 kN/cm ²
E _s =	21000 MPa	E _{ci} =	21287,4 MPa
		f _{ct} =	22,10 MPa
		γ =	1 adm.
Esforços Solicitantes:			
	Majoração das cargas =	1	
N =	-92 kN	N _u =	-92 kN
M =	18768 kN.cm	M _u =	18768 kN.cm
V =	160 kN	V _d =	160 kN
T =	0 kN.cm	T _d =	0 kN.cm
		e _x =	-204 cm

Resumo Armação:			
Armadura Superior:			
A _s ' =	0,00 cm ²	taxa arm. =	0,15 %
A _s ' ^{calc} =	0,00 cm ²	A _s ' ^{utiliz} =	0,35 cm ²
			OK!
Armadura Inferior:			
A _s =	12,70 cm ²	taxa arm. =	0,15 %
A _s ^{calc} =	12,70 cm ²	A _s ^{utiliz} =	24,13 cm ²
			OK!
Armadura lateral (por face, excluídos os cantos):			
A _s =	0,00 cm ²	taxa arm. =	0,15 %
A _s ^{calc} =	0,00 cm ²	A _s ^{utiliz} =	0,00 cm ²
			OK!
Cisalhamento:			
A _{sw} =	2,21 cm ² /m	A _{sw} ^{calc} =	2,21 cm ² /m
A _{sw} ^{utiliz} =	3,14 cm ² /m		OK!
Armadura de Pele:			
A _{smin} =	2,25 cm ² /face	A _s ^{calc} =	2,25 cm ²
		A _s ^{utiliz} =	2,53 cm ²
			OK!

(b)

Figura 7 – Verificações estruturais conforme ABNT NBR 6118 (2019). (a) laje do tabuleiro; (b) viga principal.

Em sequência, após a verificação da reprovação dos pilares P2 e P19 com propriedades originais de projeto, optou-se em refazer a análise considerando o concreto com sua resistência atual, de 36,5 MPa. Os pilares foram verificados a partir do SAP 2000 v.16 pela norma EN 1992-1-1(2004), todavia, para garantir redundância e maior segurança de cálculo, os mesmos pilares foram verificados também através do PCalc v1.4 conforme a ABNT NBR 6118 (2019) e o resultado é exposto na Figura 8:

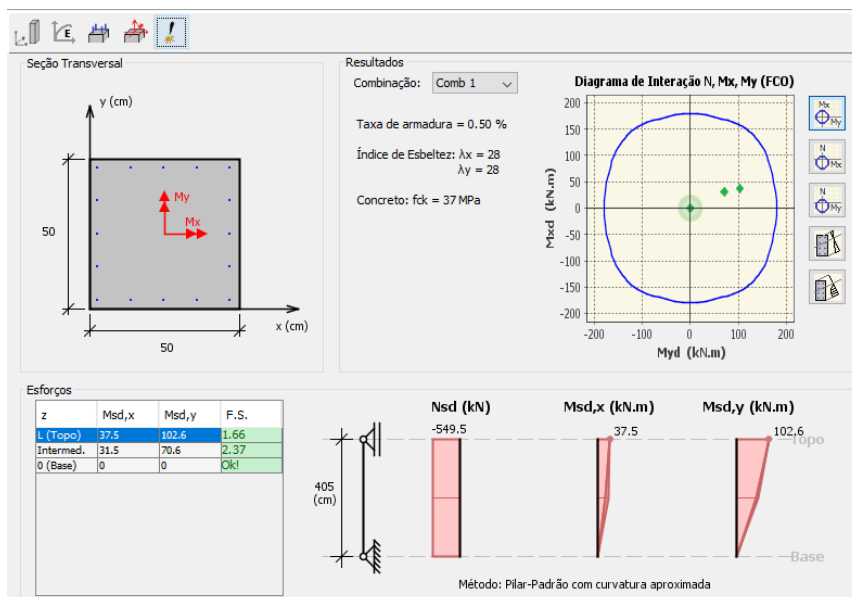


Figura 8 – Verificações dos pilares P2 e P19 com resistência corrigida conforme ABNT NBR 6118 (2019).

Nota-se que as solicitações encontram-se internas à superfície de ruptura da seção (N-M), logo os pilares, de fato, foram aprovados considerando a resistência atualizada do concreto.

Análise Estrutural - ELS

Os resultados dos deslocamentos verticais das vigas e horizontais dos topos dos pilares são apresentados a seguir:

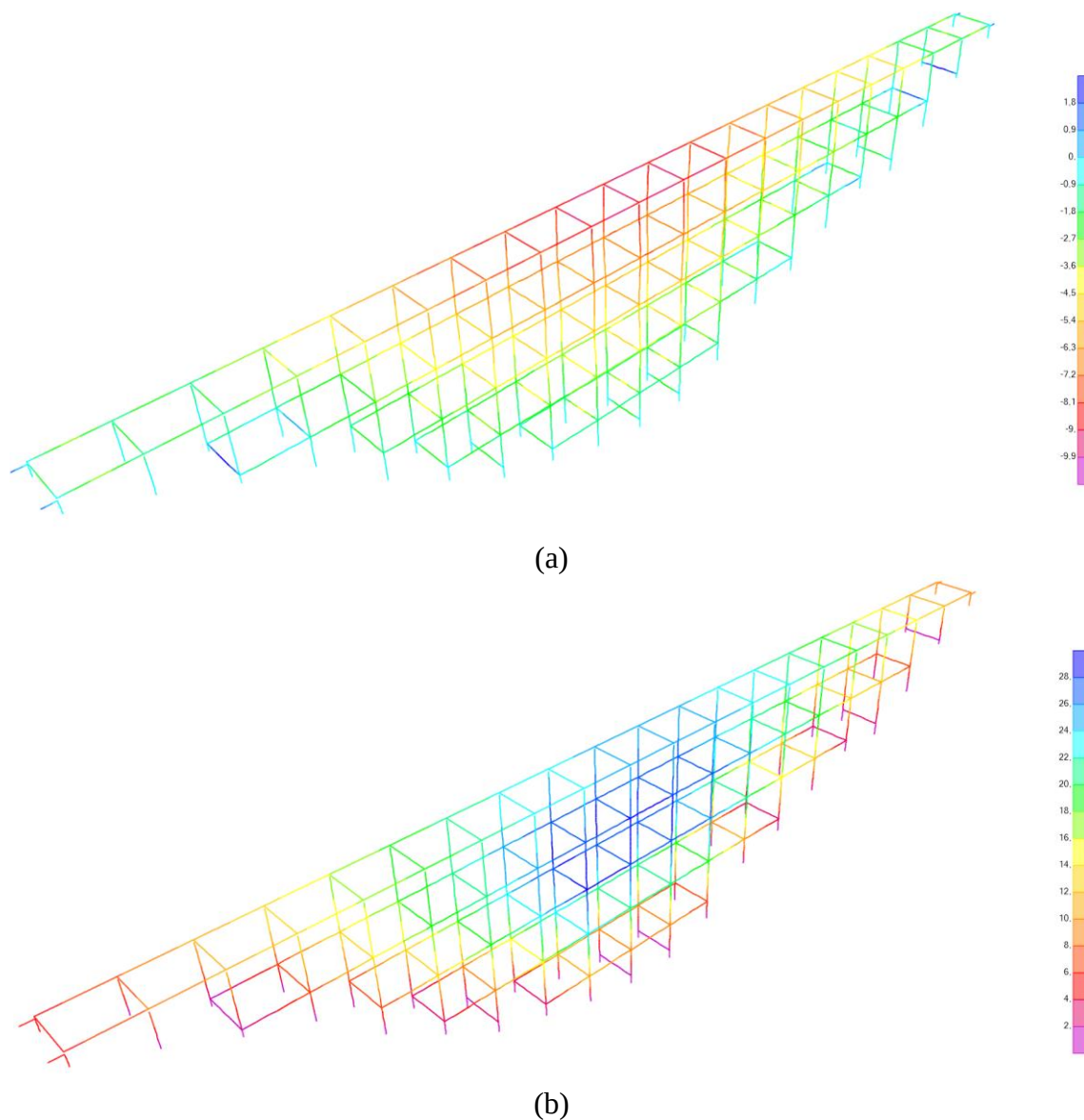


Figura 9 – Avaliação dos deslocamentos da estrutura. (a) verticais; (b) horizontais.

Nota-se que o deslocamento máximo vertical obtido foi de 9,9 mm. Sendo o deslocamento máximo permitido de $L/350 = 6.700 \text{ mm}/350 = 19,1 \text{ mm}$, a estrutura foi aprovada para tal ELS. Ainda, o deslocamento máximo horizontal no topo dos pilares foi de 28 mm, sendo o deslocamento máximo permitido de $H/400 = 31.200/400 = 78,0 \text{ mm}$, a estrutura também foi aprovada para este estado limite de serviço.

Classificação Segundo a ABNT NBR 9452 (2019)

Após as inspeções e ensaios de campo realizados e apresentados anteriormente, verificou-se que a estrutura do viaduto apresenta pontos localizados de exposição de armadura e de lixiviação, sem comprometer sua integridade estrutural e sem causar desconforto ou insegurança aos seus usuários. Dessa forma, segundo a ABNT NBR 9452 (2019), o viaduto pode ser classificado da seguinte maneira através de parâmetros estruturais, funcionais e de durabilidade, conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 2 – Classificação segundo a ABNT NBR 9452 (2019).

Parâmetro	Super Estrutura	Meso Estrutura	Infra Estrutura	Elementos Complementares	Pista	Nota Final
Estrutural	4	5	NA	NA	5	4
Funcional	4	NA	NA	NA	3	3
Durabilidade	4	4	NA	NA	4	4

Verificou-se que todos os elementos estruturais podem ser acessados, seja pelo solo ou via trabalho em altura. Por fim, é possível constatar que a obra apresenta bom comportamento estrutural durante mais de 60 anos após o início de sua operação, como verificado pelos modelos numéricos desenvolvidos. Assim, segundo o anexo D da ABNT NBR 7187 (2021), de acordo com as informações apresentadas segundo a ABNT NBR 9452 (2019), seria possível ainda realizar a redução dos coeficientes de majoração das ações permanentes para o valor de 1,20 e das ações variáveis em geral (excetuando-se as cargas térmicas e de ventos) para 1,35, de acordo com o anexo D da ABNT NBR 7187 (2021).

Conclusões

Após todos os procedimentos, ensaios e análises desenvolvidos no viaduto da Mutuquinha (Mina da Mutuca -Vale), foi possível concluir que foram encontradas informações das armaduras de projeto divergentes das reais, sendo obtidos valores reduzidos atuais. A resistência do concreto elevou-se em 54,7% ao longo de 60 anos em relação ao valor inicial de projeto. As análises estruturais apontaram reprovações de alguns pilares da estrutura considerando as informações originais de projeto, todavia, os mesmos elementos foram aprovados para a resistência corrigida do concreto. Dada a segurança estrutural garantida pelos cálculos realizados e a manutenção/inspeção frequentes da estrutura, pode-se afirmar que a Vale tem cumprido seus objetivos principais de garantir segurança às pessoas e reduzir riscos operacionais.

Referências

- AGUIAR, José Eduardo. Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado Aparentes. Belo Horizonte, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187: Projeto de pontes, viaduto e passarelas de concreto. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: Ações devido ao tráfego de veículo rodoviários e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7680: Extração de corpos de prova de concreto. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9452: Inspeção de Pontes, Viadutos e Passarelas de Concreto – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- BU, LIJING; ZHANG, ZHENGPENG. Application Of Point Clouds From Terrestrial 3d Laser Scanner For Deformation Measurements. 2008.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1992-1-1:2004 - Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2004.
- MORRISON, NELSON. Interacción suelo-estructuras: semiespaço de winkler. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 1993.
- HELENE, Paulo R. L. Corrosão em Armaduras para Concreto Armado. São Paulo: Editora Pini, 1986.
- ZHANG, CHENGYI; ARDITI, DAVID; LIU, PENG. Integrating Laser-scanning Technology into a Construction Engineering and Management Curriculum. 2021. DOI: 10.18260/1-2--37361.