



Padrões normativos (PNRs) da Vale no projeto de estruturas: um comparativo com as normas brasileiras

Débora Coelho Cordeiro Pinheiro¹, Denise Aparecida Barbosa², Raphael Pedrosa Heleno³,

^{1,2} VALE S/A / Engenharia de Projetos Ferroviários / Gerência de Projetos Urbanos e Infraestrutura

³ VALE S/A / Engenharia de Integridade Estrutural / Gerência de Engenharia de Usina Sul

¹debora.pinheiro@vale.com, ²denise.barbosa2@vale.com, ³raphael.heleno@vale.com

Resumo

Os padrões normativos da Vale (PNRs) são documentos que contêm procedimentos e padrões a serem seguidos em projetos da companhia, com o objetivo de garantir a integridade, segurança e eficiência das operações. Os PNRs da Vale, de abrangência global, foram elaborados com a premissa de se adotar os critérios mais seguros dentre os comumente aplicados pela comunidade técnica mundial. Desta forma, os requisitos dos PNRs são, em sua maioria, são mais restritivos do que as normas brasileiras da ABNT.

Neste artigo, com o objetivo de difundir e alinhar o entendimento dos padrões normativos da Vale, é apresentada uma análise comparativa entre os requisitos dos PNRs PNR-000019 (Estruturas – Obras de Arte Especiais – Geral), PNR-000084 (Integridade Estrutural – Estruturas de Concreto) e PNR-000083 (Estruturas – Fundações) e os das normas brasileiras NBR 6118:2023, NBR 9062:2017, NBR 6122:2022. Os principais aspectos analisados são: Classificação em termos classe de agressividade ambiental; cobrimentos mínimos; resistência característica do concreto à compressão (fck) mínima; quantidade e profundidade de furos de sondagem.

Palavras-chave

Padrões normativos; Projeto estrutural; Concreto armado; Cobrimento; fck

Introdução

Os padrões normativos da Vale, chamados de PNRs, contêm as orientações e requisitos mandatórios mínimos de segurança e integridade aplicáveis no desempenho de atividades na Vale. Os PNRs foram criados em resposta ao rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho, com o objetivo aumentar a segurança dos ativos e de toda a operação da Vale tanto no Brasil quanto internacionalmente.

Os PNRs são classificados em três categorias: gerencial, transversal e específico. Os PNRs gerenciais fornecem requisitos e métodos empregados no sistema de gestão adotado em cada área da empresa. Os demais padrões normativos estabelecem critérios técnicos gerais a serem aplicados em ativos e em todas as fases de suas vidas, que contempla o projeto, execução, comissionamento, inspeção, manutenção e descomissionamento. Os padrões normativos transversais são aplicados a todos os ativos se diferenciando apenas pela disciplina construtiva, os padrões normativos específicos são subjugados aos padrões transversais e focam em famílias específicas de ativos.

Os padrões normativos foram elaborados em comitês técnicos promovidos pela Vale com empresas especializadas e seguradoras incorporando os critérios mais restritivos dentre as normas e recomendações nacionais e internacionais analisadas visando minimizar a probabilidade de ocorrência de eventos materiais indesejados. Os padrões normativos adotam critérios restritivos baseados em melhores práticas da indústria, lições aprendidas com acidentes ocorridos e potenciais e análise de situações de falhas da Vale. Por isso, esse documento apresenta critérios de projeto geralmente mais conservadores que os critérios estabelecidos pelas normas nacionais de projeto estrutural.

Para avaliar os impactos dos PNRs no projeto de obras de arte especiais serão analisados os requisitos propostos pelos padrões normativos transversais PNR-000083 - Estruturas – Fundações, PNR-000084 - Integridade Estrutural - Estruturas de Concreto, além dos requisitos do padrão normativo específico PNR-000019 - Obras de Arte Especiais – Geral.

Revisão bibliográfica

Vida útil de projeto da estrutura - O PNR-000047, em sua Tabela 18, indica que o tempo de vida para projeto de obras de arte especiais deve ser menor ou igual a 100 anos. Para obras de arte especiais, o tempo de vida para projeto de 100 anos preconizado pelo PNR-000047 é adotado baseado na Tabela 2.1 do Eurocode 0 (EN 1990). Quanto às normas brasileiras, a NBR 15575-1 define a vida útil de projeto mínima como 50 anos, baseada na norma NBR 8681:2003: que considera o período de 50 anos como um “período convencional de referência”. A NBR 15575-1:2013, na Tabela C.6 de seu anexo C, apresenta valores mínimos de vida útil de projeto de 50, 63 e 75 anos, para desempenho estrutural mínimo, intermediário e superior, respectivamente. Entretanto, nas estruturas de concreto, a vida útil de projeto não tem impacto direto na definição das resistências características e cobrimentos mínimos da NBR 6118:2023. No EN 1992, por sua vez, onde se baseiam os cobrimentos mínimos do PNR-000084, a vida útil tem impacto direto sobre o cobrimento mínimo.

Classificação da Ponte – O PNR-000020 estabelece critérios para classificar a criticidade de uma ponte em função do tipo de carga transportada por ela, idade desde a construção, sistema estrutural, agressividade do meio ambiente, redundância logística e outros parâmetros. São definidas três classes sendo a Classe 1 as pontes mais críticas, a Classe 2 as pontes moderadamente críticas e a Classe 3 as pontes de criticidade normal.

Classificação da agressividade do ambiente – O PNR-000084 (item 6.2.1.1) apresenta a classificação da agressividade do ambiente. A classificação apresentada na Tabela 2 do PNR-000084, baseada na EN1992, considera: baixo risco de ataque químico (X0); corrosão induzida por carbonatação (XC) (Tabela 1, a seguir), cloretos (XD) e cloretos de água do mar (XS); congelamento e descongelamento (XF); ataque por agentes químicos (XA).

Tabela 1 – Adaptação da Tabela 2 do PNR-000084: Classes para Corrosão induzida por carbonatação

Classe de exposição	Descrição do ambiente	Exemplos
XC1	Seco ou permanentemente saturado em água	Concreto em partes internas de edificações com baixa umidade ou concreto submerso em água
XC2	Quase permanentemente saturado em água	Concreto para fundações
XC3	Moderadamente úmido	Concreto em partes internas de edificações com umidade do ar moderada ou alta ou em partes externas protegidas da chuva
XC4	Ciclicamente seco e saturado	Concreto sujeito ao contato com água não enquadrado na classe XC2

A NBR 6118:2023, por sua vez, descreve em sua Tabela 6.1 (ver Tabela 2 deste trabalho) as classes de agressividade ambiental da estrutura (CAA): I, II, III e IV, consideradas de agressividade fraca, moderada, forte e muito forte, respectivamente. A classe de agressividade está diretamente relacionada a durabilidade, tendo impacto nas definições de classe de concreto, cobrimento e abertura de fissuras.

Tabela 2– Adaptação da Tabela 6.1 da NBR 6118:2023: Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submerso	Insignificante
II	Moderada	Urbano	Pequeno
III	Forte	Marinho Industrial	Grande
IV	Muito forte	Industrial Respingos de maré	Elevado

Resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) mínima – O PNR-000019, em sua Tabela 1 estabelece parâmetros mínimos de f_{ck} e relação água cimento (a/c), sendo $f_{ck} \geq 30\text{MPa}$ e $a/c \leq 0,55$ para os elementos estruturais em concreto armado, e $f_{ck} \geq 35\text{MPa}$ e $a/c \leq 0,50$ para os elementos estruturais em concreto protendido. Por outro lado, o PNR-000084 (item 6.2.2.1) preconiza que os novos projetos de ativos da Vale em concreto devem possuir f_{ck} mínimo de 20 MPa para estruturas de concreto simples e de 25 MPa para estruturas de concreto armado ou protendido; mas para as peças em concreto sujeitas à ação de abrasão devido ao tráfego de veículos, sua Tabela 15 (adaptada da Tabela 4.7 da AS 3600:2009) determina que as resistências características mínimas devem variar de 25MPa a 40MPa, e possuir relação $a/c \leq 0,50$.

A Tabela 12 e a Tabela 13 do PNR-000084, ambas adaptadas de ACI 318:2019, EN 1992-1-1:2004 e NBR 6118:2014, fornecem os valores para a classe de resistência mínima, para a relação a/c máxima e para o

consumo mínimo de cimento em função da agressividade do ambiente; sendo que caso a estrutura esteja exposta tanto a corrosão quanto ao dano, deve-se adotar o menor valor de relação a/c, porém caso a estrutura esteja exposta tanto a corrosão quanto ao dano, deve-se adotar a maior classe de resistência e o maior consumo de cimento. Além disso, a Tabela 12 do PNR-000084 indica para a classe de exposição XC1, a classe de resistência mínima igual a 25 MPa e a relação a/c $\leq 0,65$. O Quadro F.1 da EN 206-1:2017 evidencia que o PNR-000084 exige valores superiores de fck em comparação à norma europeia. A Tabela 4 apresenta os critérios mínimos apresentados no PNR-000084 e na EN 206-1:2017.

A NBR 6118:2023 determina em sua Tabela 6.1 a classe de agressividade ambiental da estrutura, e em sua Tabela 7.1 determina a classe de resistência do concreto e a relação água-cimento (a/c) em função da classe de agressividade. A classe de resistência mínima é igual a 20 MPa para concreto armado e 25 MPa para concreto protendido, considerando Classe de Agressividade I.

Para argamassa, a NBR 6122:2022 determina: fck ≥ 20 MPa, agregado areia, consumo de cimento igual ou superior a 600 kg/m³ e fator água/cimento entre 0,5 e 0,6.

Tabela 3– Adaptação da Tabela 7.1 da NBR 6118:2023 e da Tabela 2 da NBR 12655:2022: Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m ³	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

Tabela 4– Indicação dos critérios de qualidade mínimos devido à corrosão (Adaptação da Tabela 12 do PNR-000084 e do Quadro F.1 da EN 206-1:2017)

Critério	Corrosão por carbonatação				Corrosão por cloretos			Corrosão marítima		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
PNR-000084	Classe de resistência mínima	C25	C30	C35	C40	C35	C40	C35		C40
	Relação a/c máxima	0,65	0,60	0,55	0,50	0,55	0,45		0,45	
	Consumo mínimo de cimento (kg/m ³)	260	280		300	300	320	300	320	340
EN 206-1:2017	Classe de resistência mínima)	C20	C25	C30	C30	C30	C30	C35	C30	C35
	Relação a/c máxima	0,65	0,60	0,55	0,50	0,55	0,55	0,45	0,50	0,45
	Consumo mínimo de cimento (kg/m ³)	260	280	280	300	300	300	320	300	320

Portanto, as seguintes definições foram estabelecidas para os novos ativos, referentes à resistência à compressão característica (fck): o valor mínimo para fck a ser utilizado em estruturas de passarelas e viadutos deve ser de 30 MPa; o valor mínimo para fck de concreto simples de soleiras de muros de contenção deve ser de 20 MPa, conforme item 6.2.2.1.5 do PNR-000084; a classificação deve ser feita por elemento/grupo de elementos da estrutura. Há um entendimento geral de que os elementos estruturais referentes à infraestrutura sejam classificados como XC2 e os referentes à mesoestrutura e superestrutura, como XC4, o que implica em fcks mínimos de C30 (XC2) e C40 (XC4); a argamassa de estacas raiz deve ser especificada com fck ≥ 30 MPa, conforme Tabela 1 PNR-000019 e Tabela 12 do PNR-000084, porém o consumo mínimo de cimento deve atender à NBR 6122:2022.

Cobrimentos mínimos - Os PNRs de estruturas de concreto (PNR-000084), fundações (PNR-000083) e obras de arte especiais (PNR-000019) possuem requisitos que dizem respeito aos cobrimentos mínimos que devem ser adotados nas áreas Vale. Para OAEs, o PNR-000019, em sua Tabela 1, estabelece cobrimento mínimo de 40 mm para concreto armado e 45 mm para concreto protendido, devendo ser observados também os parâmetros do PNR-000084. O PNR-000084 (item 6.2.3.1) apresenta o EN1992-1-1 como referência para a determinação dos cobrimentos. Ainda, conforme item 6.2.3.1 (iv) do PNR-000084, peças de concreto armado em contato com o solo possuem cobrimento mínimo de 40 mm para concreto moldado em solo regularizado com concreto magro e 75 mm para concreto moldado diretamente sobre o solo.

No PNR-000084, o cobrimento mínimo (C_{mín}) deve ser definido como o maior dentre os valores apresentados nas equações a seguir. A parcela devido a tolerâncias construtivas está considerada em todas as equações:

a. Solidarização entre as partes constituintes: $C_{mín} \geq C_{solid} + C_{const}$ (1)

b. Proteção de armaduras devido à agressividade ambiental: $C_{\min} \geq C_{dur} + C_{const} - (\Delta C_{dur,st} + \Delta C_{dur,add})$ (2)

c. Resistência à incêndio: $C_{\min} \geq C_{fogo} + C_{const}$ (3)

Onde: $C_{\min}$ é o cobrimento mínimo; C_{const} é o cobrimento adicional devido a tolerâncias construtivas, igual a 5 mm em situações de alto controle de tolerâncias de formas e posicionamento das armaduras e a 10 mm nos demais casos; C_{solid} é o cobrimento para solidarização entre partes constituintes (concreto e aço); C_{dur} é o cobrimento para proteção das armaduras (devido às condições ambientais); $\Delta C_{dur,st}$ é a redução do cobrimento devido ao uso de aço inoxidável; $\Delta C_{dur,add}$ é a redução do cobrimento devido ao uso de cobertura adicional protetiva; C_{fogo} é o cobrimento mínimo devido a ação de incêndio.

Para a definição do C_{dur} é primeiro necessário definir a classe estrutural conforme a Tabela a seguir. Parte-se da classe S4 (para vida útil de projeto de 50 anos) e soma-se ou subtrai-se valores em função de características como: vida útil de projeto, classe de resistência do concreto, geometria do elemento, qualidade do concreto.

Tabela 5– Adaptação da Tabela 4.3N do EN1992-1: Determinação da classe da estrutura

	Classe de exposição conforme Tabela 4.1 do EN1992-1						
	X0	XC1	XC2/ XC3	XC4	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
Vida útil de 100 anos	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes	Aumentar 2 classes
Classe de resistência	$\geq C30$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$	$\geq C40$	$\geq C40$	$\geq C45$
	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe
Elemento com geometria de laje	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe
Controle especial na produção do concreto	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe	Reduzir 1 classe

Uma vez definida a classe estrutural, determina-se C_{dur} para armaduras passivas e ativas na tabela a seguir.

Tabela 6– Adaptação das Tabelas 4.4N e Tabela 4.5N do EN1992-1: Cobrimento C_{dur} para armaduras ativas e passivas, mm

Classe estrutural	Tabela 4.4N – armaduras passivas				Tabela 4.5N – armaduras ativas		
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XC1	XC2/XC3	XC4
S1	10	10	10	15	15	20	25
S2	10	10	15	20	15	25	30
S3	10	10	20	25	20	30	35
S4	10	15	25	30	30	35	40
S5	10	20	30	35	20	40	45
S6	10	25	35	40	35	45	50

O cobrimento de peças destinadas a estruturas de fundação deve obedecer aos requisitos do PNR-000083. O cobrimento de trechos de pilares em contato com o solo deve obedecer ao mais restritivo entre os requisitos do PNR-000083 e PNR-000084. De acordo com o PNR-000083, para estruturas em concreto armado em contato com solo em meio agressivo, o cobrimento mínimo das armaduras deve atender à Tabela 33 do PNR-000083, com cobrimento variando de 55 mm a 100 mm, dependendo do nível de agressividade do solo.

Na norma NBR 6118:2023 o cobrimento de armadura nominal (C_{nom}) é a soma do cobrimento mínimo $C_{\min}$ com a tolerância de fabricação (Δc). A Tabela 7, a seguir, extraída da NBR6118:2023, apresenta os cobrimentos nominais para $\Delta c = 10$ mm. Para elementos pré-moldados, a norma NBR 9062:2017 permite que Δc seja adotado igual a 5 mm (item 9.2.1.1.1). Ainda, em seu item 9.2.1.1.2, a NBR 9062:2017 possibilita a redução de mais 5 mm no cobrimento nominal se o f_{ck} for superior a 40 MPa e a relação água/cimento for menor ou igual a 0,45. Mesmo lançando mão destas reduções, os cobrimentos nominais mínimos segundo a NBR 9062 não devem ser inferiores à: 15 mm para lajes em concreto armado; 20 mm para vigas e pilares de concreto armado; 25 mm para peças em concreto protendido; 15 mm para peças delgadas protendidas (telhas, nervuras, terças); 20 mm para lajes alveolares protendidas.

Para elementos pré-moldados, a norma NBR 9062:2017 permite que Δc seja adotado igual a 5 mm (item 9.2.1.1.1). Ainda, em seu item 9.2.1.1.2, a NBR 9062:2017 possibilita a redução de mais 5 mm no cobrimento nominal se o f_{ck} for superior a 40 MPa e a relação água/cimento for menor ou igual a 0,45. Mesmo lançando mão destas reduções, os cobrimentos nominais mínimos segundo a NBR 9062 não devem ser inferiores à: 15

mm para lajes em concreto armado; 20 mm para vigas e pilares de concreto armado; 25 mm para peças em concreto protendido; 15 mm para peças delgadas protendidas (telhas, nervuras, terças); 20 mm para lajes alveolares protendidas.

Tabela 7– Adaptação da Tabela 7.2 da NBR 6118: Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm (em mm)

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	CAA I		CAA II	CAA III	CAA IV
Concreto armado	Laje	20	25	35		45
	Viga/ Pilar	25	30	40/ 45 (contado com o solo)		50
	Elementos estruturais em contato com solo	30	30	40		50
Concreto protendido	Laje	25	30	40		50
	Viga/ Pilar	30	35	45		55

Investigações geotécnicas - quantidade de furos de sondagem - Os PNRs e a NBR6122:2022 exigem que seja realizada, no mínimo, uma sondagem por percussão (SPT) para cada obra. Conforme o item 4.1.1 da NBR 8036:1983, a quantidade de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de uma ponte depende da área da projeção da superestrutura e encontro sobre o solo. Para áreas de até 200 m², são necessários 2 furos, para áreas superiores de até 600 m² são necessários 3 furos e para áreas maiores que 600 m² a cada 200 m² adicionados, 1 furo de sondagem também deve ser adicionado até 2000m².

Conforme estabelecido no PNR-000083, item 6.2.1 (vii), e no PNR-000019, item 6.2.2 (ii), os critérios de sondagem para obras de arte especiais requerem a realização de um furo de sondagem para cada dois apoios no projeto básico. No que tange ao projeto detalhado, é exigido um furo de sondagem para cada apoio. Adicionalmente, caso a largura da mesoestrutura ultrapasse 30 metros, o PNR determina que sejam realizados dois furos por apoio na fase de projeto detalhado.

Investigações geotécnicas – profundidade mínima de furos de sondagem - No que se refere à execução de sondagens por percussão, conforme disposto no item 4.1.2.2 da NBR8036:1983, estas devem ser realizadas até a profundidade em que o solo não seja mais significativamente afetado pelas cargas estruturais. Para tal, a norma estabelece como critério a profundidade mínima (D) na qual o acréscimo de pressão no solo, resultante das cargas estruturais aplicadas, seja inferior a 10% da pressão geostática efetiva. O ábaco apresentado na Figura para um solo de com peso específico de 3 kN/m³ auxilia na determinação da profundidade mínima de sondagem. Essa profundidade D é medida a partir do nível do solo, diferentemente da profundidade fornecida pelo PNR.

Neste ábaco, q representa tensão média aplicada pelo edifício no terreno de fundação em kN/m² que é igual ao quociente do peso da edificação pela área projetada dos retângulos que circunscreve as estacas, B é a menor dimensão do retângulo que circunscreve as estacas e L é a maior dimensão deste retângulo.

Conforme estipulado no item 6.2.1 (vii), do PNR-000083, a profundidade mínima abaixo da cota mais baixa de ponta da fundação, conforme prevista no projeto conceitual, deve ser equivalente a seis vezes a menor dimensão (B) do retângulo circunscrito pelas estacas em planta. Adicionalmente, o item 6.2.2(ii) do PNR-000019 indica que a profundidade mínima abaixo dessa cota deve ser de, no mínimo, 6 metros. Vale ressaltar que essa dimensão é medida a partir da cota de ponta da estaca enquanto a orientação da NBR especifica uma dimensão medida a partir do nível do solo

Fundações Profundas – Resistência da estaca determinada por prova de carga estática – A norma NBR 6122:2022 e o PNR-000083 permitem a determinação da resistência das estacas em contato com o solo a partir de provas de carga estáticas desde que os valores de cargas aplicados cheguem a no mínimo duas vezes o valor da carga admissível de projeto.

A resistência característica das estacas com o solo (R_k) pode ser determinada pelo menor valor dentre:

$$R_k = \min \begin{cases} R_{pc,med}/\xi_3 \\ R_{pc,min}/\xi_4 \end{cases} \quad (4)$$

Em que $R_{pc,med}$ é a resistência determinada com base nos valores médios dos resultados das provas de carga, $R_{pc,min}$ é a resistência determinada com base nos valores mínimos dos resultados das provas de carga e os ξ_3 e ξ_4 são coeficientes de minoração da resistência fornecidos pela Tabela 8 em função da quantidade de provas

de carga (n) realizadas na mesma região e em estacas com as mesmas características. A divergência entre os coeficientes da NBR 6122:2022 e do PNR-000083 pode ser observada no comparativo.

Tabela 8 – Coeficiente de ponderação da resistência das estacas em função da quantidade de provas de carga realizadas

Norma ou documento normativo	n	1	2	3	4	5
NBR 6122:2022	ξ_3	1,14	1,11	1,07	1,04	1,00
	ξ_4	1,14	1,10	1,05	1,02	1,00
PNR-000083	ξ_3	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
	ξ_4	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

Metodologia

Com o objetivo de avaliar os impactos da adoção dos PNRs no projeto de uma OAE Ferroviária, serão avaliados qualitativamente aspectos de uma ponte ferroviária em concreto armado e protendido. A Ponte Ferroviária sobre o córrego do Sabão, projetada para o trem-tipo COOPER-E80, é apresentada nas imagens a seguir. A ponte possui 5 vãos isostáticos de cerca de 30 m cada. O tabuleiro é composto por duas longarinas pré-moldadas e protendidas e laje de concreto armado, com pré-laje. O comprimento da superestrutura totaliza 151,6 m, a largura do tabuleiro é de 6,0 m. A infraestrutura dos pilares é composta por 4 estacas escavadas revestidas com camisa metálica recuperável cravada em rocha sã e blocos de coroamento sustentam a mesoestrutura em pilares em seção transversal retangular vazada. Os encontros são compostos por 5 estacas em sua infraestrutura. De forma preliminar foram realizados 12 furos de sondagem com profundidade máxima de 30m para a elaboração do projeto básico, sendo ao menos um furo para cada apoio da superestrutura locado na linha de eixo da obra. Próximo a locação do pilar B e do encontro F foram realizados dois furos adicionais e outros 4 furos no entorno da obra afastados da linha de centro.

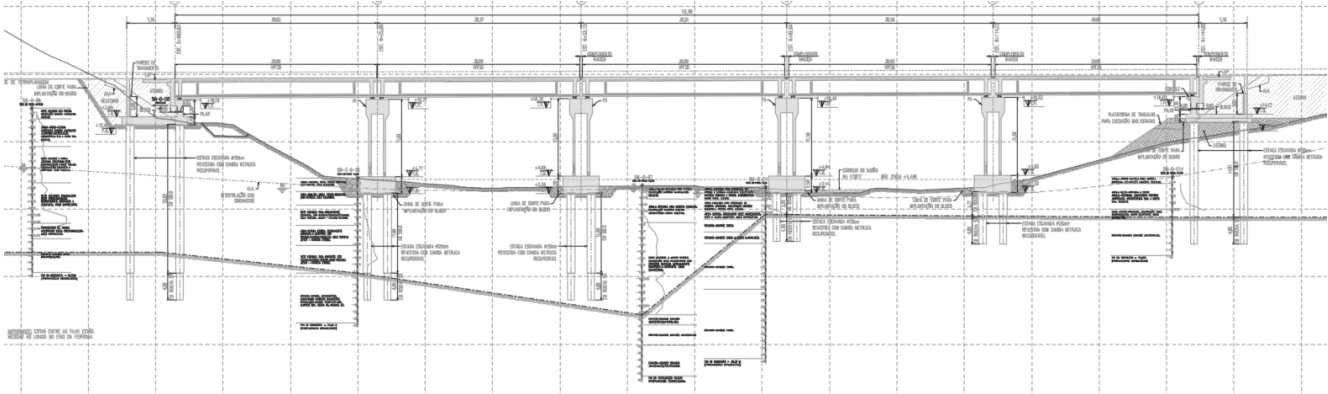


Figura 2 – Elevação da ponte

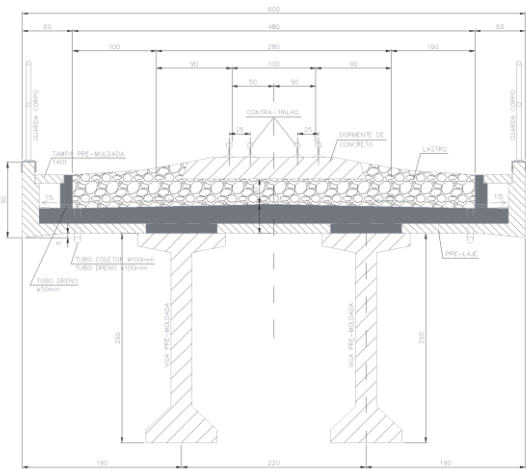


Figura 3 – Seção transversal típica

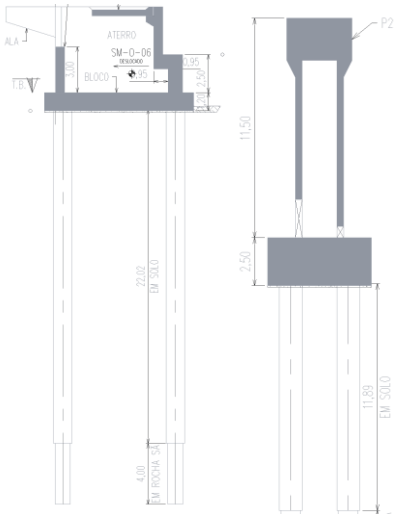


Figura 4 – Fundação do pilar e do encontro.

Análise comparativa entre os critérios dos PNRs e das NBRs - Serão avaliados para a estrutura apresentada, a luz dos PNRs e das normas brasileiras: vida útil de projeto, classe de agressividade, classe do concreto e cobrimentos. Do ponto de vista de investigações geotécnicas serão avaliadas a profundidade mínima e a quantidade de furos definida pelas duas orientações de projeto. Por se tratar de uma obra de fundação profunda

serão avaliados apenas os critérios de projeto de fundações profundas. Serão comparadas as quantidades de prova de carga em estaca de trabalho e provas de carga em estaca piloto para essa obra aplicando as orientações dos PNRs e das NBRs. A variação percentual na resistência característica da estaca definida a partir das provas de carga piloto será calculada baseada na diferença entre os coeficientes de ponderação e na quantidade mínima exigida de provas de carga em estacas piloto, pois não há, até o momento, resultados de prova de carga uma vez que a obra ainda não se iniciou.

Resultados

Vida útil de projeto – Conforme PNR-000047, a vida útil de projeto mínima adotada para a Ponte sobre o Córrego do Sabão deve ser de 100 anos. Alternativamente, seguindo o usual pelas normas brasileiras, a vida útil de projeto mínima seria de 50 anos.

Classificação de criticidade do ativo – A ponte foi classificada conforme sua criticidade conforme PNR-000020, considerando: ativo com menos de 15 anos, que poderá transportar pessoas, possui acesso para inspeção por meio de andaimes, a substituição da superestrutura seria por içamento em caso de colapso, trata-se de uma via férrea singela, com sistema estrutural estático bi-apoiado e traçado curvo com sistema de contratrilhos, o tabuleiro lastreado está apoiado sobre aparelhos de apoio do tipo pot-bearing e a obra está localizada em uma zona rural. Com base nessas informações o ativo foi definido como Classe 3.

Classificação da agressividade do ambiente – A ponte em questão não está sujeita a ciclos de congelamento e descongelamento, nem a ataques por agentes químicos e corrosão por cloretos. Desta forma, a estrutura será classificada somente quanto ao risco de corrosão por carbonatação. A a classificação conforme PNR-000084 quanto ao risco de corrosão por carbonatação é: Longarinas, Transversinas, Lajes, Pré-lajes, Pilares, Encontros, Blocos, e aje de transição são XC4, considerados em ambiente ciclicamente seco e saturado; Estacas são XC2, consideradas quase permanentemente saturadas em água.

Considerando a classificação do PNR-000084 quanto ao risco de corrosão por carbonatação, toda a estrutura está classificada com XC4, com exceção das estacas, classificadas como XC2. Alternativamente, no caso das pré-lajes estarem completamente ao abrigo da chuva, as mesmas poderiam ser classificadas como XC3.

Quanto a CAA da NBR 6118:2023, a ponte se enquadra na CAA II. Entretanto, os requisitos dos PNRs serão comparados também com a CAA III.

Classe de resistência do concreto – Na Tabela a seguir são apresentadas as resistências características a compressão do concreto mínimas, levando em conta as classes de agressividade ambiental definidas anteriormente, para os PNRs e as CAA II e III da NBR6118:2023. Ainda, a título de comparação, são apresentadas as classes correspondentes ao mínimo recomendado pela EN206-1.

Tabela 9 – Classe de resistência mínima do concreto em função da classe de agressividade

Elemento	Classificação do PNR-000084/ EN1992-1-1/ EN206-1	Fck mínimo (PNR-000084)	Fck mínimo (PNR-000019)	Fck (NBR6118 e NBR6122, Classe de agressividade II)	Fck ((NBR6118 e NBR6122, Classe de agressividade III)	EN1992-1-1/ EN206-1
Longarinas	XC4	C40	C35	C30	C35	C30
Transversinas	XC4	C40	C35	C30	C35	C30
Laje	XC4	C40	C30	C25	C30	C30
Pré-laje	XC4	C40	C30	C25	C30	C30
Encontros	XC4	C40	C30	C25	C30	C30
Blocos	XC4	C40	C30	C25	C30	C30
Estacas	XC2	C30	C30	C20	C20	C25
Laje de transição	XC4	C40	C30	C25	C30	C30

A partir das informações apresentadas, é possível observar que os requisitos do PNR-000084 são os mais restritivos em termos de classe de concreto. Os requisitos do PNR-000084, apesar de inspirados no EN1992-1-1/ EN206-1, são mais restritivos até mesmo que as normas europeias em termos de classe de resistência mínima. A classe de resistência superior do concreto do PNR-000084, por outro lado, propicia a redução da classe estrutural, levando a cobrimentos menores do que as classes mínimas da EN206-1.

Cobrimentos pelo PNR-000084 – Será considerada a Equação (2), referente ao cobrimento mínimo considerando a durabilidade. Será empregado $\Delta C_{dur,st} = \Delta C_{dur,add} = 0$, ou seja $C_{mín} \geq C_{dur} + C_{const}$. Na Tabela 10 é apresentada a definição da classe estrutural conforme Tabela 5 para vigas e pilares (S4) e laje, pré-laje e laje de transição (S3).

Tabela 10 – Definição da classe estrutural (conforme Tabela 5)

Tabela 4.3N da EN1992-1-1

vigas e pilares laje, pré-laje e laje de transição

Classe estrutural inicial considerando vida útil de 50 anos	S	4	S	4
Vida útil de projeto de 100 anos	sim	2	sim	2
Classe de exposição	XC4		XC4	
Classe do concreto	C40	-1	C40	-1
Qualidade do concreto garantida	sim	-1	sim	-1
Membro com geometria de laje	não	0	sim	-1
Classe estrutural final	S	4	S	3

Tabela 11 – Definição de $C_{mín}$ (conforme Equação 2Tabela 5)

	Cconst	Cdur	$C_{mín}$
longarinas protendidas e pré-moldadas - armadura ativa	5	30	35
longarinas protendidas e pré-moldadas - armadura passiva	5	40	45
transversinas em concreto armado	10	30	40
laje em concreto armado	10	25	35
pré-laje em concreto armado pré-moldado	5	25	30
pilares em concreto armado	10	30	40

Cobrimento da fundação pelo PNR-000083 – Em relação ao cobrimento dos elementos de fundação, foi considerado solo em meio agressivo com alto teor de sulfato > 10.000 ppm e/ou $pH < 4$, o que resulta em cobrimento de 55 mm.

Cobrimento da fundação pelo PNR-000019 – Adota-se cobrimento mínimo para os elementos de concreto armado como 40 mm e dos elementos em concreto protendido como 45 mm (armadura ativa).

Cobrimento pelas NBRs 6118 e 9062 – Para os elementos em concreto armado, adotam-se os cobrimentos mínimos da Tabela 15. Para os elementos pré-moldados, adotam-se os cobrimentos mínimos da Tabela 15 com as reduções permitidas pela NBR 9062. Neste caso, emprega-se 10 mm a menos do que os limites da NBR 6118, considerando $\Delta c = 5$ mm e C40 com relação água/cimento menor ou igual a 0,45, quando este valor for superior ao mínimo estipulado pela NBR 9062.

A Tabela a seguir apresenta um resumo dos cobrimentos obtidos conforme PNR-000084, PNR-000083, PNR-000019 e NBRs considerando CAA II e III. A título de comparação, são indicados também os cobrimentos do PNR-000084 para vida útil de projeto de 50 anos.

Tabela 12 – Cobrimentos mínimos do concreto em função da classe de agressividade

Elemento	$C_{mín}$ (PNR- 000084 – 50 anos)	$C_{mín}$ (PNR- 000084 – 100 anos)	$C_{mín}$ (PNR- 000083)	$C_{mín}$ (PNR- 000019)	$C_{mín}$ (NBR 6118, CAA II)	$C_{mín}$ (NBR 9062, CAA II)	$C_{mín}$ (NBR 6118, CAA III)	$C_{mín}$ (NBR 9062, CAA III)	$C_{mín}$ adotado
Longarinas	35 mm (ativa) 25 mm (passiva)	45 mm (ativa) 35 mm (passiva)	--	45 mm (ativa) 40 mm (passiva)	35 mm (ativa) 30 mm (passiva)	25 mm (ativa) 25 mm (passiva)	45 mm (ativa) 40 mm (passiva)	35 mm (ativa) 30 mm (passiva)	45 mm (ativa) 40 mm (passiva)
Transversinas	30 mm	40 mm	--	40 mm	30 mm		40 mm		40 mm
Lajes	25 mm	35 mm	--	40 mm	25 mm		35 mm		40 mm
Pré-laje	20 mm	25 mm	--	40 mm	25 mm	15 mm	35 mm	25 mm	40 mm
Pilares	30 mm	40 mm	--	40 mm	30 mm		40 mm		40 mm
Paredes dos encontros	30 mm	40 mm	--	40 mm	40 mm		40 mm		40 mm
Blocos de fundação	--	--	55 mm	40 mm	30 mm		40 mm		55 mm
Estacas	--	--	55 mm	40 mm	30 mm		40 mm		55 mm
Laje de Tr	25 mm	35 mm	--	40 mm	30 mm		40 mm		40 mm

A análise dos resultados da Tabela 12, nos permite afirmar que:

- A exigência para uma vida útil de 100 anos obrigatória para OAEs conforme o PNR-000047 e o PNR-000084, resultou em cobrimentos mínimos equivalentes aos da CAA III da NBR 6118 para as transversinas, lajes, pré-lajes, pilares, paredes de encontro, se fossem considerados somente os limites do PNR-000084. Entretanto, quando se consideram o limite do PNR-000019 de 40 mm, lajes e pré-lajes ficam com cobrimento superiores aos da CAA III da NBR 6118.

- Para as longarinas pré-moldadas e protendidas, os valores de $C_{mín}$ dos PNR-000019, ficam iguais aos da NBR 6118 com CAA III, mas superiores aos da NBR 9062 com a mesma classe de agressividade.

- Quanto aos cobrimentos da fundação, observa-se que se o solo for agressivo, o cobrimento mínimo é superior ao mínimo da NBR 6118 (referenciada pela NBR 612 para o cobrimento).

- Os limites do PNR-000019 para OAEs levam a cobrimentos superiores ao determinado pelo PNR-000084 para longarinas, lajes e pré-lajes.

Investigação geotécnica – quantidade de furos – A área projetada do tabuleiro sobre o solo é de 1090 m² e foi calculada levando em consideração a área projetada dos encontros, do tabuleiro e dos blocos dos pilares. A quantidade mínima de furos de sondagem para a investigação geotécnica do solo nessa obra conforme a NBR 8036:1983 é igual a 6 furos. Os PNRs estabelecem um furo de sondagem por apoio locado na linha de centro da obra, resultando em 6 furos, uma vez que há 4 pilares e 2 encontros na obra.

Os 12 furos realizados para o projeto básico estão em conformidade com as duas orientações de projeto que apresentaram o mesmo resultado para a quantidade mínima de furos. Essa convergência nos valores mínimos de furo é algo esperado para esse comprimento e largura de tabuleiro, pois cada vão de 30m adicionado representa 180m² a mais de área projetada e a quantidade de furos é proporcional ao aumento da área resultando em uma relação aproximada de um furo a cada 200 m².

Investigação geotécnica – profundidade mínima de furos – o PNR estabelece que a profundidade mínima abaixo da cota de assentamento seja 6 vezes a menor dimensão do retângulo circunscrito nas estacas. As estacas formam um retângulo circunscrito com as dimensões: 760 x 860 cm para o E01; 630 x 420 para o B1. Sendo assim, a profundidade mínima de sondagem abaixo da cota de ponta da estaca é 46m para o furo dos encontros e 38m para os furos dos pilares. Esses valores devem ser adicionados ao comprimento aproximado das estacas dos encontros e dos pilares de 22m e 16m, respectivamente. Portanto, a profundidade mínima de sondagem medida a partir do nível do solo conforme os PNRs é de 68m para os encontros e 54m para os pilares. Pela a NBR8036:1983, a profundidade mínima pode ser determinada a partir da pressão média que pode ser calculada a partir do peso estimado da obra de 4500 toneladas sobre a área dos retângulos circunscritos de 236 m², resultando no valor de 187 kN/m³. Aplicando o ábaco da NBR 8036:1983, são obtidas as relações D/B iguais a 4,8 e 3,9 para o pilar e para os encontros, respectivamente, conforme mostrado na Figura 8. Sendo assim, os valores de profundidade mínima de sondagem medida a partir do nível do solo conforme os PNRs é de 30 m para os encontros e 21 m para os pilares.

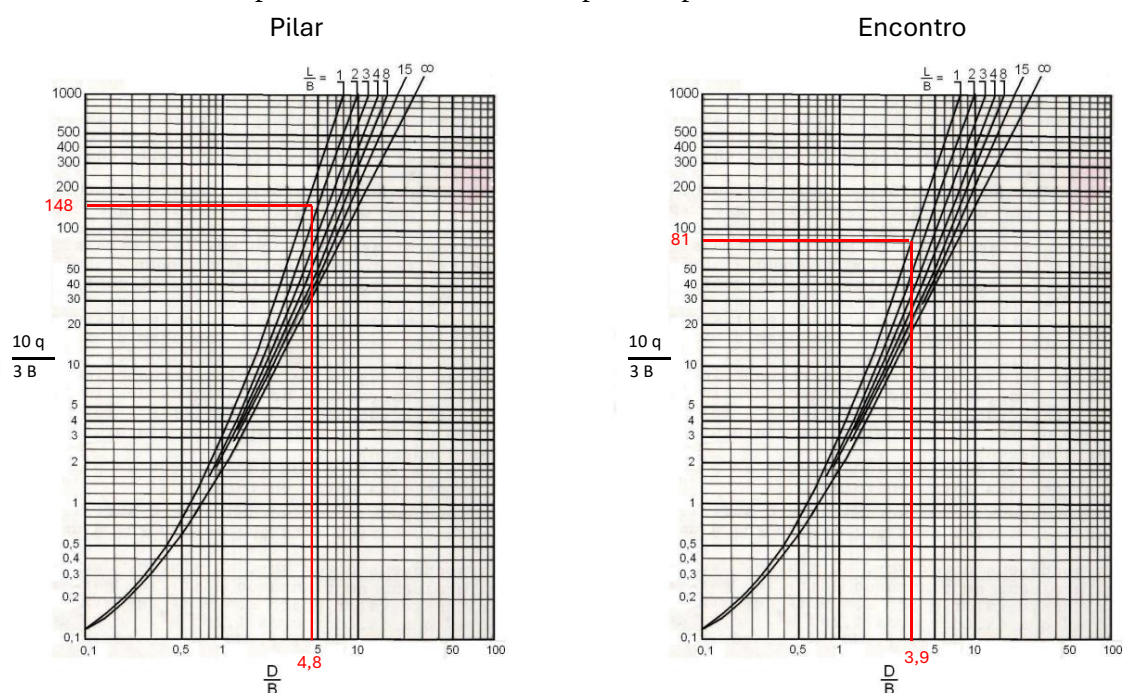


Figura 8 - Ábaco de profundidade de sondagem aplicado para a ponte sobre o córrego do Sabão.

Adaptado da NBR 8036:1983.

Tabela 13– Tensão média característica nas estacas da Ponte sobre o córrego do Sabão.

Bloco	Carga característica [kN]	Área das estacas [mm ²]	Tensão [MPa]	Bloco	Carga característica [kN]	Área das estacas [mm ²]	Tensão [MPa]
BE01	5080	1130973,4	4,49	B2	4825	1130973,4	4,27
BE02	5135	1130973,4	4,54	B3	5680	1130973,4	5,02
B1	4935	1130973,4	4,36	B4	5495	1130973,4	4,86

Fundações Profundas – Resistência da estaca determinada por prova de carga estática – Para a determinação da resistência característica do sistema estaca e solo será considerado a realização de apenas uma prova de carga com estacas piloto ao início da obra, uma vez que esse requisito foi definido como mínimo pelo PNR-000020. Assim os coeficientes de ponderação da resistência ξ_3 e ξ_4 para a prova de carga realizada serão iguais a 1,14 conforme a NBR 6122:2022 e 1,4 conforme o PNR-000083. Essa divergência irá resultar em uma redução de 19% na resistência calculada conforme o PNR-000083.

Conclusões

O presente artigo abordou a análise comparativa entre os PNRs e as normas brasileiras, com ênfase nas implicações desses padrões na elaboração de projetos estruturais. Evidenciou-se que os PNRs foram desenvolvidos em resposta a eventos críticos e visam garantir a integridade e segurança das estruturas, adotando critérios mais rigorosos do que os estabelecidos pelas normas da ABNT.

A metodologia aplicada incluiu uma análise dos principais PNRs para estruturas, como o PNR-000083 e PNR-000084, em comparação com as normas NBR 6118:2023 e NBR 6122:2022. Os resultados demonstraram que os PNRs impõem requisitos mais restritivos em diversos aspectos, como resistência característica do concreto e cobrimentos mínimos. Por exemplo, a resistência mínima exigida para estruturas de concreto armado é de 30 MPa nos PNRs, enquanto a NBR 6118:2023 recomenda 20 MPa. A determinação dos cobrimentos mínimos por meio dos PNRs é mais trabalhosa do que o proposto pelas NBRs 6118 e 9062, além de ser mais restritiva. A análise mostrou que a resistência mínima do concreto para estruturas de OAEs, segundo os PNRs, é, em média, 33% superior àquela definida pela NBR, refletindo uma abordagem mais conservadora e voltada para a durabilidade. As exigências de cobrimento mínimo também variaram, com os PNRs exigindo, em alguns casos, até 33% a mais de cobrimento em comparação às normas brasileiras, especialmente em estruturas expostas a ambientes agressivos.

Não foram constatadas divergências entre a quantidade mínima de furos de sondagem exigidas pelos PNRs e pelas NBRs. Contudo, foi observado uma diferença de mais de 200% na profundidade mínima exigida para os furos de sondagem conforme os PNRs em comparação com as NBRs, algo que pode impactar significativamente nos custos iniciais do projeto.

Além disso, ao aplicar os PNRs é necessário realizar um pré-dimensionamento das estacas durante a fase conceitual do projeto antes de realizar as sondagens para que seja possível definir essa profundidade. Os valores de resistência da estaca calculados a partir dos resultados da prova de carga com estaca piloto são 19% inferiores, caso sejam aplicados os coeficientes do PNR-000083 em detrimento da NBR 6122:2022.

Em suma, a adoção dos PNRs da Vale resulta em um aumento considerável da segurança estrutural e da durabilidade das obras, embora implique em custos adicionais e maior complexidade na execução dos projetos. A busca por melhores práticas e a aprendizagem com falhas passadas são fundamentais para a evolução contínua das normas e padrões de segurança. Contudo, é importante estabelecer uma relação entre o aumento da segurança e o aumento dos custos em trabalhos futuros para que essa relação custo-benefício possa ser avaliada de forma quantitativa.

Referências

- ABNT. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. 2023.
- ABNT. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. 2022.
- ABNT. NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios.1983.
- ABNT. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. 2003.
- ABNT. NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. 2017
- ABNT. NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. 2013.
- ECS. EN 1990: Eurocode - Basis of structural design. 2002.
- ECS. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004.
- VALE. PNR-000019 – Estruturas – Obras de Arte Especiais – Geral. 2022.
- VALE. PNR-000020 – Estruturas – Obras de Arte Especiais – Pontes Rodoferroviárias. 2022.
- VALE. PNR-000083 – Estruturas – Fundações. 2023.
- VALE. PNR-000084 – Integridade Estrutural – Estruturas de Concreto. 2022.
- VALE. PNR-000047 – Integridade Estrutural – Geral. 2024.
- Standards Australia. AS 3600-2018: Concrete structures. 2018.