XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8425

APLICAÇÃO DO CONCRETO PROTENDIDO EM PAVIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO: ESTUDO DE CASO DA BA-262

PRESTRESSED CONCRETE APPLICATION IN HIGH-PERFORMANCE PAVEMENTS: CASE STUDY OF BA-262

Thayla Santana Pereira
Universidade Estadual de Santa Cruz | Ilhéus | Brasil | tspereira.ppgeca@uesc.br
Pedro Luis Ferreira Silva
Universidade Estadual de Santa Cruz | Ilhéus | Brasil | plfsilva.egc@uesc.br
Cleverson Alves de Lima
Universidade Estadual de Santa Cruz | Ilhéus | Brasil | clalima@uesc.br
Cleomaria da Mata Macedo
Universidade Federal do Espirito Santo | Ilhéus | Brasil | cmmacedo.egc@uesc.br
Julia Ramos Fernandes
Universidade Federal do Espirito Santo | Ilhéus | Brasil | jrfernandes.egc@uesc.br
Igor Luiz dos Santos Rocha
Universidade Estadual de Santa Cruz | Ilhéus | Brasil | ilsrocha.ppgeca@uesc.br

Resumo

Com o crescimento acelerado da frota de veículos, os pavimentos rodoviários enfrentam níveis crescentes de deterioração, exigindo soluções mais duráveis e eficazes. Este estudo propõe a avaliação do concreto protendido como alternativa técnica para os pavimentos rodoviários em um cenário de alto tráfego na BA262, considerando o aumento do tráfego previsto com a implantação do Complexo Intermodal Porto Sul. A protensão permite reduzir a espessura da placa, diminuir o número de juntas e aumentar a vida útil da estrutura, com menor incidência de fissuras. A metodologia contempla o cálculo das perdas imediatas e progressivas de protensão, o efeito de cargas veiculares, gradientes térmicos, atrito com a sub-base e verificação dos estados limites de fissuração e último. Os resultados indicaram que a espessura de 14 cm, com armadura longitudinal de 1 ø12,7 mm a cada 32,4 cm e transversal de 1 ø12,7 mm a cada 51,5 cm, atende aos critérios de desempenho. O coeficiente de segurança à fissuração superou o valor mínimo 1,00 e atendimento do estado limite último. Em comparação com o pavimento rígido convencional, observou-se redução de 6 cm na espessura e menor quantidade de aço.

Palavras-chave: Concreto protendido. Pavimentos rodoviários. Desempenho e Segurança. Whitetopping.

Abstract

With the rapid growth of the vehicle fleet, road pavements face increasing levels of deterioration, requiring more durable and effective solutions. This study proposes the evaluation of prestressed concrete as a technical alternative for road pavements in a high-traffic scenario on the BA262 highway, considering the expected increase in traffic with the implementation of the Porto Sul Intermodal Complex. Prestressing allows for a reduction in slab thickness, a decrease in the number of joints, and an increase in the structure's lifespan, with a

PEREIRA, T. S.; SILVA, P. L. F.; LIMA, C. A.; MACEDO, C. M.; FERNANDES, J. R.; ROCHA, I. L. S. Aplicação do concreto protendido em pavimentos de alto desempenho: estudo de caso da BA262. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

lower incidence of cracking. The methodology includes the calculation of immediate and progressive prestressing losses, the effect of vehicle loads, thermal gradients, friction with the sub-base, and verification of the cracking and ultimate limit states. The results indicated that a thickness of 14 cm, with longitudinal reinforcement of 1 ø12.7 mm every 32.4 cm and transverse reinforcement of 1 ø12.7 mm every 51.5 cm, meets the performance criteria. The safety factor against cracking exceeded the minimum value of 1.00, meeting the ultimate limit state. Compared to conventional rigid pavement, a 6 cm reduction in thickness and a smaller amount of steel were observed.

Keywords: Prestressed concrete. Highway pavements. Structural design. Whitetopping

INTRODUÇÃO

Com o crescimento acelerado da frota de veículos, os pavimentos vêm apresentando deterioração em ritmo igualmente elevado, exigindo constantes intervenções de reabilitação ou substituição. No entanto, as obras de pavimentação podem provocar grandes congestionamentos, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Esses atrasos no tráfego geram custos adicionais aos usuários, como aumento no consumo de combustível, perda de tempo produtivo, entre outros fatores. Diante disso, torna-se necessária uma metodologia que permita a construção de pavimentos duráveis e de alto desempenho [1] [2].

No contexto da Rodovia BA-262 entre Ilhéus-BA BR-101, [3] apontou a necessidade do uso de pavimentos rígidos com 17 cm de espessura em *whitetopping*, que apesar de sua menor complexidade construtiva, requer maior uso de materiais para suportar esforços de tração na flexão, devido à ausência de armadura. Apontou ainda ao adicionar a armadura no pavimento rígido, houve redução para 10 cm com desempenho equivalente, reduzindo custos devido ao menor consumo de materiais e garantindo a resistência e durabilidade.

Segundo [4], a protensão aplicada gera uma compressão prévia no concreto criando uma reserva de tensão que possibilita uma redução significativa na espessura da placa. Essa compressão torna a placa praticamente impermeável e livre de fissuras, protegendo assim a sub-base. Esta técnica consiste no tracionamento de cordoalhas com o auxílio de cilindros hidráulicos e aplicação de carga ativa sobre o elemento estrutural, antes (pré-tensão) ou após (pós-tensão) a moldagem e cura do concreto.

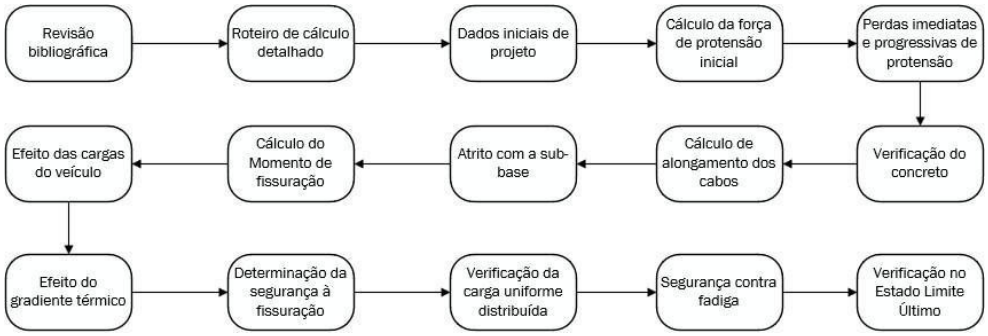
Neste contexto, observou-se uma lacuna na aplicação em pavimentos rígidos em larga escala nas rodovias brasileiras, restringindo-se a pátios industriais ou de manobra com área limitada. Isto ocorre devido a ausência de metodologias desenvolvidas para este fim requerendo a adaptação de técnicas desenvolvidas para outras tipologias, como pavimentos portuários.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica da aplicação do concreto protendido no dimensionamento de pavimentos rodoviários, por meio de um estudo de caso aplicado à rodovia BA-262, considerando as condições de carregamento e os critérios normativos vigentes.

METODOLOGIA

A aplicação parte do método aplicado por [5] que considera dois casos a serem analisados: o primeiro caso considera o ponto onde a compressão no concreto é mínima, localizado no meio da placa (L/2), devido às perdas de protensão; o segundo refere-se ao ponto de repouso (xt), onde a compressão no concreto atinge seu máximo valor. Para isto, faz-se necessário levantar os dados geotécnicos das camadas de solo da superestrutura estradal, com o objetivo de avaliar as características e propriedades mecânicas. Neste estudo de caso, optou-se por adotar as características geométricas do trecho da BA-262 associados aos parâmetros geotécnicos [6]. A adaptação para o projeto rodoviário contemplou ajustes e padronizações nas dimensões geométricas, nos parâmetros de carga e nas quantidades de aço, segundo o fluxo descrito na Figura 1.

Figura 1: Fluxo metodológico aplicado



Fonte: adaptado de Santos (2015).

A força máxima de tração aplicada aos cabos de protensão corresponde ao estágio anterior à liberação dos macacos hidráulicos e à ocorrência de qualquer perda de protensão. Os parâmetros calculados foram definidos levando em consideração as tensões de escoamento e de ruptura do aço utilizado [7]. As perdas imediatas ocorrem no instante t_o, após a transferência da protensão ao concreto, sendo decorrentes da acomodação das ancoragens, do atrito cabo-bainha e do encurtamento elástico. A diferença entre o meio da placa e o ponto de repouso está apenas no cálculo do atrito, no qual se utiliza a distância x_r neste último caso.

CALCULOS DAS PERDAS DE LONGO PRAZO

Considerando a alta durabilidade do material, faz-se necessário estudar as perdas de resistência de longo prazo. Para isto, foram consideradas como perdas: a redução do atrito entre o cabo de protensão e a bainha, acomodação das ancoragens, encurtamento elástico do concreto, perdas de protensão e o atrito com a sub-base.

A Equação 1 permite determinar as perdas por atrito, de acordo com a norma NBR 6118 [8]:

$$\Delta P_{atr} = P_i \left[1 - e^{-\left(\mu \sum \square \alpha + Kx \right)} \right] \quad (1)$$

Onde: ΔPatr = perdas por atrito; Pi = força de protensão inicial; x = distância até o ponto para o qual se calcula; ∑α = soma dos ângulos de desvio de projeto; μ = coeficiente de

atrito aparente entre o cabo e a bainha; K = coeficiente de perda por metro provocada por curvaturas não intencionais.

Quando os macacos de protensão são removidos, ocorre a acomodação das ancoragens. Nesse momento, o cabo realiza um movimento no sentido oposto ao da protensão, resultando em uma redução da força de protensão até atingir o ponto de equilíbrio (xr). Para determinação desse ponto utiliza-se a Equação 2:

$$xr = \sqrt{\frac{E_p \cdot A_p \cdot \delta \cdot L}{2 \Delta P_{atr}}} \quad (2)$$

Seguindo [7], na protensão com aderência posterior, ao tracionar um cabo do pavimento, o concreto sofre deformação, resultando em um encurtamento que reduz a tensão nos cabos que foram tracionados anteriormente. Assim, apenas o último cabo tracionado não apresenta perda de protensão devido ao encurtamento elástico. Segundo [8], a perda por encurtamento elástico pode ser calculada pela Equação 3:

$$\Delta P_{ela} = \Delta\sigma_p . A_p \ (3)$$

Onde: ΔP_{ela} *= perda de protensão por encurtamento elástico; Δσp = perda média de protensão por cabo; Ap = área de aço de protensão por metro de largura.*

Além das perdas imediatas, também ocorrem perdas de protensão ao longo do tempo e devem ser calculadas a partir da equação do item 9.6.3.4.2 da [8].

Se o atrito com a sub-base for muito alto, pode consumir toda a força de protensão na região central da placa. Para evitar esse problema, é necessário limitar o comprimento do pavimento. Segundo [3], o comprimento ideal varia entre 100 e 150 metros. As Equações 4 e 5 apresentam as forças de atrito:

$$F_{\alpha 1} = \frac{L}{2} . (\gamma . h) . \mu (4) \quad F_{\alpha 1} = xr . (\gamma . h) . \mu \ (5)$$

Onde: Fα = força de atrito; μ = coeficiente de atrito entre a placa e a sub-base; γ = peso específico do concreto protendido; h = espessura do pavimento.

COMBINAÇÕES PARA O CÁLCULO DE MOMENTO DE FISSURAÇÃO E SEGURANÇA

Segundo [5] e [6], o momento de fissuração deve ser avaliado em duas situações: na Situação A, considerando o gradiente térmico, e na Situação B, o atrito com a sub-base. Em ambas, são incluídas a protensão inicial e suas perdas, sendo que os efeitos não são combinados por atuarem de forma oposta. A verificação da segurança contra fissuração é feita por meio do coeficiente γfis que representa a razão entre o momento de fissuração (Mr) e o momento de serviço (Ms). Conforme [7], o coeficiente de majoração das ações no estado limite de serviço γf é igual a 1,0. Assim, não há necessidade de aplicar ponderação ao momento de serviço:

$$Y_{fis} = \frac{M_r}{M_s} \ (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método foi adaptado a partir do cálculo de pavimento portuário proposto por [7] para a aplicação rodoviária. A magnitude da protensão nas direções longitudinal e transversal foi considerado equivalente, pois ambas estão submetidas às mesmas condições de carga, gradiente térmico, atrito com a sub-base e perdas de protensão. Assim, foram dimensionadas as armaduras buscando garantir a segurança com a menor quantidade de materiais, utilizando uma planilha de cálculo para definição dos valores adotados. Dessa forma foram definidos: Armadura de protensão longitudinal: 37 ø12,7 mm a cada 12 m, ou seja, 1 ø12,7 mm a cada 32,4 cm; Armadura de protensão Transversal: 194 ø12,7 mm a cada 20m, ou seja, 1 ø12,7 mm a cada 51,5 cm.

Conforme [7] foram definidos os parâmetros de campo, geométricos, de carga, de aço e do concreto e sintetizados no Quadro 1. Os valores adotados para o concreto e aço de protensão foram os indicados por [6] e [9].

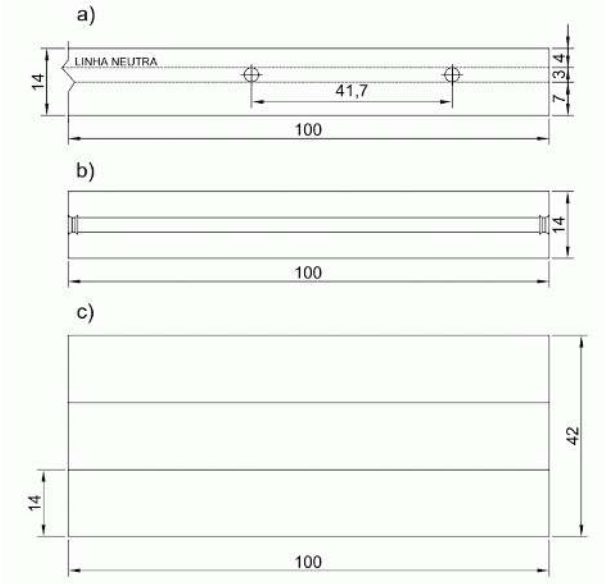
Quadro 1: Dados iniciais sintéticos adotados

DADOS GEOMÉTRICOS			DADOS DE CARGA	
Espessura do pavimento (h) [m]	0,14		Carga uniforme distribuída [kN/m²]	40
Largura da faixa de concretagem [m]	12		Carga no eixo duplo mais carregado [kN]	166,71
Número de cabos na faixa de concretagem	37			

Fonte: Adaptado de [6]

Segue abaixo o desenho da placa com a disposição dos cabos, as medidas estão em cm.

Figura 2: Pavimento em concreto protendido: a)Seção transversal; b)Seção longitudinal e c)Vista superior do pavimento e suas faixas de concretagem.



Fonte: Adaptado de [9]

O coeficiente de segurança à fissuração indicado por [6] supera o valor mínimo estabelecido por [7], podendo-se inferir que o elemento atendeu satisfatoriamente aos critérios de verificação da segurança à fissuração para a rodovia analisada.

Verificação do Estado Limite Último

A segurança da estrutura em relação aos estados-limites últimos (ELU) segue o estabelecido por [7], sendo necessário determinar o momento máximo que o pavimento pode resistir sem colapso. Para garantir a segurança, esse momento resistente deve ser superior à soma dos momentos gerados pelo gradiente térmico e pela carga dos veículos, considerando os coeficientes de ponderação aplicáveis. O quadro a seguir apresenta os resultados obtidos em todas as verificações realizadas.

Verificação do Estado-limite último

Meio da Placa
Tensão no aço de protensão: σ_{pd}= 1499,275 Mpa
Momento resistente: M_{rd}= 20,535 kNm/m
Verificação: $1{,}4.M_p + 1{,}2.0{,}6.M_{\Delta T}$= 12,323 kNm/m
$M_{rd} \geq (1{,}4.M_p + 1{,}2.0{,}6.M_{\Delta T})$: Seguro contra ruptura
Ponto de Repouso
Tensão no aço de protensão: σ_{pd}= 1501,67 Mpa
Momento resistente: M_{rd}= 20,560 kNm/m
Verificação: $1{,}4.M_p + 1{,}2.0{,}6.M_{\Delta T}$= 12,323 kNm/m
$M_{rd} \geq (1{,}4.M_p + 1{,}2.0{,}6.M_{\Delta T})$: Seguro contra ruptura

O resultado mostrou-se eficiente para a armadura longitudinal de 1 ø12,7 mm a cada 32,4 cm e a espessura do pavimento de 14 centímetros. Para todos os casos analisados e as verificações confirmaram a segurança contra a ruptura.

Em seguida, o mesmo método foi aplicado considerando o número de cabos na faixa de concretagem e largura da faixa de concretagem. Os dados iniciais foram adotados de [6], [7] e [9], apresentados sinteticamente no Quadro 2.

Quadro 4: Dados iniciais (Seção Transversal)

DADOS GEOMÉTRICOS	
Largura da faixa de concretagem [m]	100,00
Comprimento entre juntas [m]	60,00
Número de cabos na faixa de concretagem	194

Os cálculos resultantes forneceram as perdas devido ao tráfego da ordem de 16,669 kN/m e durante o repouso em 12,039 kN/m, além de um coeficiente de segurança contra fissuração da ordem de 1,19 e 1,87, nas mesmas situações. Ou seja, atendem aos critérios de aptidão por serem acima de 1,0. Já para o estado limite último, os valores encontrados foram:

Verificação do Estado-limite último

Meio da Placa
Tensão no aço de protensão: σ_{pd}= 1530,186 Mpa
Momento resistente: M_{rd}= 14,363 kNm/m
Verificação: $1{,}4.M_p + 1{,}2.0{,}6.M_{\Delta T}$= 12,323 kNm/m
$M_{rd} \geq (1{,}4.M_p + 1{,}2.0{,}6.M_{\Delta T})$: Seguro contra ruptura
Ponto de Repouso

Tensão no aço de protensão: σ_{pd}= 1530,945 Mpa
Momento resistente: M_{rd}= 14,369 kNm/m
Verificação: 1,4.M_p + 1,2.0,6.$M_{\Delta T}$= 12,323 kNm/m
$M_{rd} \geq$ (1,4.M_p + 1,2.0,6.$M_{\Delta T}$) : Seguro contra ruptura

SEGURANÇA CONTRA A FADIGA

A segurança contra a fadiga segue o estabelecido por [7], sendo necessário determinar o momento de serviço, ou seja, a soma do momento devido ao gradiente térmico e do momento devido aos veículos e a intensidade da variação de tensão na armadura de protensão. Para garantir a segurança, a resistência mínima à fadiga do aço de protensão deve ser maior ou igual ao produto do coeficiente de ponderação pela variação de tensão no aço. O quadro a seguir apresenta os resultados obtidos em todas as verificações realizadas.

Segurança contra a fadiga

Solicitação para a fadiga
Momento solicitante de fadiga (Msd,fad) : 48,21 kNm/m
Variação da tensão no concreto (Δσcp)= 3,25 MPa
Deformação cíclica (Δεcp): 0,000111 m/m
Variação da tensão no aço (Δσp): 22,36 MPa
Verificação
γf . Δσ = 22,36 Mpa
Δfpd,fad,mín = 150,00 Mpa
γf . Δσp ≥ Δfpd,fad,mín : Seguro contra fadiga

Os resultados demonstraram que o pavimento atende aos critérios de segurança à fissuração e ao estado limite último, apresentando comportamento estrutural adequado e segurança contra ruptura e contra a fadiga em todas as combinações analisadas. A condição de compressão predominante, característica do concreto protendido, contribui para a redução da ocorrência de fissuras e para o aumento da durabilidade da estrutura.

A espessura de 14 cm mostrou-se suficiente nas seções longitudinal e transversal, evidenciando a eficiência da protensão na ampliação da capacidade resistente, mesmo com redução de espessura. Em comparação com pavimentos portuários, observou-se uma diminuição de 6 cm na espessura, além de menor consumo de aço, devido às condições de carregamento menos severas.

Essa redução implica benefícios econômicos e construtivos, embora a aplicação da técnica ainda demande estudos complementares quanto à execução e desempenho no longo prazo sob tráfego intenso.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho proporcionou calcular com o auxílio de uma ferramenta (planilha eletrônica) a espessura necessária para o desenvolvimento de uma rodovia em concreto protendido. Além disso, o estudo permitiu confirmar que a metodologia com os critérios de [7] não apresentou alterações em relação à versão anterior utilizada por [6].

A determinação da espessura de pavimentos protendidos está diretamente relacionada a variáveis como a resistência do solo de fundação, resistência do concreto, intensidade da protensão aplicada e às cargas de tráfego previstas. Em comparação com pavimentos de concreto convencionais, os pavimentos protendidos podem apresentar espessuras reduzidas devido ao aumento da capacidade estrutural proporcionado pela protensão.

Os resultados indicaram que, com espessura de 14 cm, foi possível garantir a segurança estrutural e atender aos requisitos normativos para estados-limite último e segurança contra fissuração. Apesar de não apresentar redução significativa de espessura em relação ao concreto armado dimensionado [2] para a rodovia BA-262, o pavimento protendido demonstrou potencial para ampliar a vida útil e reduzir a necessidade de manutenção. A técnica, embora pouco difundida no Brasil, mostrou-se viável.

DECLARAÇÃO

Os Autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] MERRITT, David K.; MCCULLOUGH, Frank; BURNS, Ned H.; SHINDLER, Anton K.. **Feasiblility of Precast Prestressed Concrete Panels for Expediting PCC Pavement Construction**. Austin, University of Texas at Austin, 2001. Disponível em: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/14847/dot_14847_DS1.pdf

[2] PEREIRA, Thayla Santana. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO TRÁFEGO NA BA-262 NO CONTEXTO PÓS IMPLANTAÇÃO DO COMPLEXO INTERMODAL: Projeção, Retenção e Solução. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharias e Computação, Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). 119p. dezembro 2025. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1l2jB12M7opHfoJfJg5od3Kk36WufJ9or/view

[3] MORAES, Eder de Assis. **Avaliação funcional e estudo de recuperação estrutural dos pavimentos nos trechos rodoviários da BA-262**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharias e Computação, Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). 74p. julho de 2024. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1UyigU09Rp01KOAyZ95mIfj8xoZMakAmk/view

[4] SCHMID, Manfred T. **Pavimentos Rígidos em Concreto Protendido**. 2.ed. Curitiba, Rudloff, 2005. Disponível em: https://www.rudloff.com.br/downloads/publicacao4_pavimentos_rigidos_em_concreto_proten dido.pdf.

[5] BASTOS, Paulo Sérgio. **Fundamentos do concreto protendido**. Bauru/SP: Universidade Estadual Paulista–UNESP, 2025. Disponível em: https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/Protendido/Ap.%20Protendido.pdf

[6] VASCONCELOS, Augusto. C.. **Documentário sobre Pavimentos de Concreto Protendido para Aeroportos e Rodovias.** Ibracon, São Paulo, 1979

[7] SANTOS, M. B. **Utilização de concreto protendido em pavimentos portuários.** Rio Grande, FURG, 2015. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS, 2015. Disponível em: https://repositorio.furg.br/bitstream/handle/123456789/12565/mateus.pdf?sequence=1&isAllo wed=y

[8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118 - Projeto e Execução de Obras de Concreto** Armado, Rio de Janeiro, ABNT, 2023.

[9] SILVA, Pedro Luis Ferreira. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E MELHORIAS DO PAVIMENTO DA BA-262. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharias e Computação, Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). 57p. julho 2025. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1DGbQigQo1jg6C1CFxn6URSKKYG14bRxu/view