

**FACULDADE EDUFOR
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

VITOR DA SILVA SOARES

DISCIPLINA: PROJETO DE TCC II

**TEMA: RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO FLEXÍVEIS EM ÁREA INDUSTRIAL:
Estudo de caso na área da Alumar (Redução, Refinaria e Porto) na cidade de
São Luis/MA**

SÃO LUÍS - MA

2025

VITOR DA SILVA SOARES

**TEMA: RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL EM ÁREA INDUSTRIAL:
Estudo de caso no Consórcio Alumar. (Redução, Refinaria e Porto) na cidade
de São Luis/MA**

Projeto de TCC II apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade Edufor para fins de elaboração de Trabalho de Conclusão de Curso, como obtenção de nota na disciplina

Orientador: Me. Franklin Roosevelt Rodrigues do Ó²

Co-orientadora: Ma. Valdilea Ferreira Lopes

SÃO LUÍS - MA

2025

**TEMA: RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTO FLEXÍVEIS EM ÁREA INDUSTRIAL:
Estudo de caso na área da Alumar (Redução, Refinaria e Porto) na cidade de
São Luis/MA**

Vitor da Silva Soares¹
Me. Franklin Roosevelt Rodrigues do Ó²
Co-orientadora: Ma. Valdilea Ferreira Lopes

Resumo

O pavimento flexível é constituído por camadas de materiais granulares e revestimento asfáltico, oferecendo adaptação a diversas condições geotécnicas e climáticas (Toledo, Correa, Jorge, 2022) e a sua durabilidade requer manutenções ao longo do tempo. O presente trabalho apresenta os tipos de restauração utilizadas nos pavimentos flexíveis nas vias/trechos de acesso interna no consórcio Alumar (Redução, Refinaria e Porto), considerando as características de tráfego, condições climáticas locais e o tipo de patologia observada. O trabalho consiste no estudo de caso na área do consórcio Alumar, identificando os tipos de restaurações utilizadas nos pavimentos flexíveis nas vias/trechos danificados. A metodologia adotada foi uma abordagem descritiva e explicativa, com base em uma revisão bibliográfica detalhada, fundamentada em pesquisas recentes, artigos científicos, teses e documentos técnicos. Além disso, foram consultados materiais de referência oficiais, manuais do DNIT e normas técnicas regulamentadoras. Nas vias/trecho do consórcio Alumar foram encontradas as deformações, e degradações no pavimento flexíveis e os tipos de restaurações aplicadas foi fresagem e recapeamento estrutural que visam aumentar a capacidade de carga do pavimento, enquanto as funcionais buscam corrigir defeitos superficiais e melhorar o conforto e a segurança da via. Por fim, foi recomendada para que as inspeções nessas vias/trechos do consórcio Alumar sejam realizadas manutenções preventivas regulares e controle constante do desempenho dos pavimentos restaurados para maximizar durabilidade e otimização de investimento em manutenção.

Palavras-chave: Restauração; Pavimento flexível; Recuperação; Estrada; Revestimento.

¹ Graduando em Engenharia Civil pela Faculdade Edufor São Luís. E-mail: vitorfidens23@gmail.com

² Engenheiro Eletricista. Mestre em Engenharia de Processos. E-mail: franklin.doo@edufor.edu.br

Abstract

Flexible pavement consists of layers of granular materials and asphalt overlay, offering adaptation to various geotechnical and climatic conditions (Toledo, Correa, Jorge, 2022). Its durability requires maintenance over time. This paper presents the types of restoration used on flexible pavements on internal access roads/sections at the Alumar consortium (Smelting, Refinery, and Port), considering traffic characteristics, local climatic conditions, and the type of pathology observed. The work consists of a case study in the Alumar consortium area, identifying the types of restorations used in flexible pavements on damaged roads/sections. The methodology adopted was a descriptive and explanatory approach, based on a detailed literature review based on recent research, scientific articles, theses, and technical documents. Furthermore, official reference materials, DNIT manuals, and regulatory technical standards were consulted. Deformations and degradations were found in the flexible pavement on the Alumar consortium roads/sections. The types of restorations applied were structural milling and resurfacing, which aim to increase the pavement's load capacity, while functional restorations seek to correct surface defects and improve road comfort and safety. Finally, it was recommended that inspections be carried out on these Alumar consortium roads/sections, along with regular preventive maintenance and ongoing monitoring of the restored pavement's performance, maximize durability and optimize maintenance investment.

Keywords: Restoration; Flexible pavement; Recovery; Road; Coating.

1 INTRODUÇÃO

O pavimento flexível, amplamente empregado em rodovias e vias urbanas, é constituído por camadas de materiais granulares e revestimento asfáltico, oferecendo adaptação a diversas condições geotécnicas e climáticas (Toledo, Correa, Jorge, 2022). Estudos recentes ressaltam sua versatilidade e facilidade de manutenção, tornando-o ideal para vias de tráfego intenso (MACHADO, SANTOS, VIEIRA, 2024).

Entretanto, sua durabilidade está diretamente ligada à realização de manutenções frequentes, o que pode impactar os custos ao longo do tempo. A escolha desse tipo de pavimento deve considerar variáveis como volume de tráfego, condições do solo e orçamento disponível (FERREIRA, SILVA, 2022).

Além disso, apesar das vantagens econômicas iniciais em comparação aos pavimentos rígidos, o pavimento flexível demanda atenção especial em regiões de grande variação térmica, fator que pode influenciar seu desempenho. Para garantir uma decisão eficiente, é essencial realizar análises detalhadas que integrem aspectos técnicos e financeiros, considerando as particularidades de cada local e sua demanda específica (CARVALHO, GOMES, MENDES, 2025).

Segundo Souza (2025), a gestão inadequada do pavimento pode comprometer a segurança operacional em áreas logísticas e industriais, elevando os custos de manutenção e reduzindo a eficiência no transporte de insumos e produtos. Métodos tradicionais de restauração nem sempre são suficientes para suportar o tráfego intenso e as cargas dinâmicas geradas por veículos pesados, exigindo, portanto, o uso de materiais de alta resistência e tecnologias inovadoras.

Além disso, a crescente necessidade de minimizar impactos ambientais e reduzir desperdícios reforça a importância de soluções sustentáveis, como o reaproveitamento de materiais e a utilização de técnicas que prolongam a vida útil do pavimento (Souza, 2025). Outro aspecto crucial é o planejamento das obras de restauração em locais com operação contínua, como a Alumar, objeto de estudo deste trabalho. A logística da planta deve ser considerada para que as intervenções no pavimento sejam realizadas sem comprometer o fluxo produtivo.

Dessa forma, torna-se essencial avaliar quais técnicas de recuperação permitem uma execução rápida e um menor impacto nas atividades industriais. Este estudo propõe investigar qual método de restauração de pavimento flexível é mais

adequado para a área da Alumar, levando em conta o tráfego intenso de veículos pesados, os requisitos operacionais da indústria e as condições climáticas locais.

A análise comparativa das técnicas de restauração existentes busca apontar a alternativa mais eficiente para minimizar custos e maximizar a durabilidade do pavimento, garantindo um ambiente operacional seguro e eficiente. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos: compreender o conceito de pavimento flexível; estudar os tipos de anomalias comuns; investigar métodos de restauração aplicados em pavimentos flexíveis; apresentar um breve histórico da área estudada; e explorar as principais formas de restauração utilizadas.

A metodologia adotada segue uma abordagem descritiva e explicativa, com base em uma revisão bibliográfica detalhada fundamentada em pesquisas recentes, artigos científicos, teses e documentos técnicos. Além disso, foram consultados materiais de referência oficiais, manuais do DNIT e normas técnicas regulamentadoras.

Foram realizadas visitas técnicas à área da Alumar para identificar os tipos de restaurações utilizadas nos pavimentos flexíveis nas vias/trechos danificados considerando as características de tráfego, condições climáticas locais e o tipo de dano observado.

A restauração de pavimentos flexíveis em ambientes industriais é um tema de grande relevância, especialmente em locais que demandam infraestrutura robusta para suportar tráfego intenso e cargas pesadas. No Consórcio Alumar, que engloba setores como Redução, Refinaria e Porto, a manutenção dos pavimentos é essencial para garantir a segurança operacional, a eficiência logística e a continuidade das atividades industriais.

O desgaste acelerado das vias internas dessa área, provocado pelo trânsito contínuo de veículos pesados e pelas condições climáticas adversas, exige soluções eficazes para prolongar a vida útil dos pavimentos e reduzir os custos com manutenção recorrente. A qualidade da infraestrutura viária impacta diretamente na segurança e fluidez do tráfego, sendo influenciada por fatores como desgaste superficial, presença de buracos, fissuras, desníveis, acúmulo de água e substâncias escorregadias, que podem comprometer a dirigibilidade e aumentar o risco de acidentes (DNIT, 2023).

2 Pavimento Flexível: Conceitos

O pavimento flexível é uma estrutura de revestimento projetada para suportar cargas ao longo do tempo sem sofrer danos permanentes. Sua capacidade de absorver deformações decorre da distribuição gradual das tensões geradas pelo tráfego entre suas múltiplas camadas. A superfície, geralmente composta por asfalto ou concreto betuminoso associado a agregados e ligantes asfálticos, proporciona resistência e durabilidade, sendo essencial para vias de alto fluxo, especialmente em ambientes industriais (DNIT, 2023).

De acordo com o manual de pavimentação do (DNIT, 2022), pavimentos flexíveis são aqueles onde todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento, distribuindo a carga de forma aproximadamente equivalente entre elas. Esses pavimentos são compostos por camadas de revestimento asfáltico sobre camadas granulares de base, sub-base e reforço do subleito, sem adição de materiais cimentícios.

Freitas (2019), enfatiza que os pavimentos flexíveis possuem vantagens como adaptabilidade para cargas dinâmicas, facilidade de manutenção e menor custo inicial em comparação aos pavimentos rígidos. Sua estrutura é composta por diferentes camadas, incluindo sub-base, base, camada intermediária e revestimento, cada uma desempenhando um papel específico na distribuição de tensões e na estabilidade da pavimentação.

Porém, o desempenho desses pavimentos depende diretamente da qualidade dos materiais utilizados e das condições ambientais às quais estão expostos. Conforme apontado por Silva et al. (2021a), em áreas industriais como as instalações da Alumar, onde há tráfego constante de veículos pesados e equipamentos, o desgaste ocorre de forma acelerada, tornando indispensáveis intervenções periódicas para manutenção e restauração.

Do ponto de vista técnico, os pavimentos flexíveis dissipam as forças aplicadas pelos veículos de maneira controlada, garantindo que as camadas inferiores distribuam essas tensões para o solo e preservem a integridade estrutural do sistema (Ferrari, 2020). Esse funcionamento é fundamental para assegurar longevidade e segurança em vias sujeitas a condições operacionais extremas.

A longevidade dos pavimentos flexíveis depende diretamente da eficácia do seu dimensionamento estrutural, do rigor no controle de qualidade dos materiais e

da correta execução das etapas de construção. Em projetos voltados para áreas industriais e logísticas, como portos, refinarias e grandes unidades de processamento, esses aspectos tornam-se ainda mais essenciais. De acordo com Oliveira e Mendes (2022), falhas precoces nesses pavimentos frequentemente resultam de problemas como compactação insuficiente, escolha inadequada de materiais e falta de manutenção preventiva.

A conservação de pavimentos em ambientes industriais deve seguir estratégias que considerem a intensidade do tráfego e as condições ambientais específicas, como umidade, temperatura e exposição a agentes químicos presentes no solo ou nos materiais transportados. Em áreas de circulação contínua de veículos pesados, por exemplo, é fundamental um controle rigoroso da compactação e, em alguns casos, a utilização de ligantes asfálticos modificados para garantir maior resistência ao desgaste e à deformação ao longo do tempo (GONÇALVES et al., 2020).

Uma estratégia frequentemente utilizada em ambientes industriais é a aplicação da fresagem e recapeamento, um método que consiste na sobreposição de uma nova camada asfáltica de alta densidade e espessura controlada sobre o pavimento existente. Essa abordagem tem demonstrado eficiência na recuperação da capacidade estrutural do pavimento e na melhoria das condições de circulação, especialmente em áreas sujeitas a cargas intensas e repetitivas (ARAÚJO et al., 2022). Além disso, a impermeabilização, ao criar uma barreira eficaz contra a água, evita todos esses problemas, garantindo a durabilidade, segurança e salubridade da estrutura, reduzindo a infiltração de água e evitando a deterioração acelerada das camadas inferiores.

O monitoramento de pavimentos flexíveis também tem evoluído com o avanço tecnológico. A implementação de sistemas inteligentes de gestão de pavimentos (SIGP), sensores integrados e inspeções realizadas por drones permite uma avaliação mais detalhada das condições das vias, facilitando a identificação do momento ideal para intervenções e a escolha das estratégias de manutenção mais eficazes (Lima e Santos, 2023). Essas tecnologias geram benefícios expressivos, tanto na redução de custos quanto na prevenção de danos estruturais graves.

Além disso, práticas sustentáveis têm sido incorporadas às soluções de pavimentação. Métodos como a utilização de misturas mornas (*Warm Mix Asphalt – WMA*), o reaproveitamento de pavimentos antigos (*Reclaimed Asphalt Pavement –*

RAP) e a aplicação de aditivos para aumentar a durabilidade das camadas estão sendo adotados para mitigar impactos ambientais e otimizar o uso de recursos naturais (Melo e Rodrigues, 2023). Essas iniciativas são especialmente relevantes para projetos que buscam aliar desempenho técnico à responsabilidade ambiental e social.

Ressalta-se que Sim, práticas sustentáveis estão sendo cada vez mais incorporadas em soluções de pavimentação, com destaque para o uso de misturas mornas (Warm Mix Asphalt - WMA) e o reaproveitamento de pavimentos antigos (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP). Essas técnicas visam reduzir o impacto ambiental da construção e manutenção de estradas, além de otimizar custos.

Por fim, embora o pavimento flexível ofereça diversas vantagens, sua eficácia depende de uma abordagem integrada, que envolva desde o planejamento do tráfego e a seleção de materiais até a adoção de técnicas de construção adequadas e a implementação de processos contínuos de monitoramento e manutenção. Conforme apontam Souza e Barreto (2021), a harmonização desses elementos não apenas prolonga a vida útil do pavimento, mas também melhora a eficiência operacional e a segurança em ambientes industriais.

2.1 Tipos de patologias existentes em pavimentos flexíveis

De acordo com Lima et al. (2022), em pavimentos flexíveis, as anomalias mais comuns incluem fendas (trincas), afundamentos, ondulações, escorregamento, exsudação, desgaste e buracos/panelas. Estas patologias podem surgir devido a diversos fatores, como falhas na construção, tráfego intenso, condições climáticas adversas e envelhecimento do material.

Os pavimentos flexíveis estão sujeitos a diversas falhas que podem comprometer sua funcionalidade e vida útil. Segundo Santos e Ferreira (2020a), problemas estruturais e funcionais podem se manifestar em forma de deformações plásticas, fissuras e desgastes superficiais. As trilhas de rodagem, por exemplo, surgem devido ao tráfego repetitivo e ao deslocamento lateral dos materiais do pavimento (COSTA, OLIVEIRA, 2021).

A ocorrência dessas deformações geralmente está relacionada à utilização de misturas asfálticas com resistência insuficiente para suportar as cargas aplicadas. O

afundamento localizado, por sua vez, decorre da perda de suporte da base do pavimento, frequentemente associada a problemas de drenagem ou à presença de materiais inadequados na estrutura subjacente (LIMA, ALMEIDA, 2022).

A fissuração por fadiga resulta da repetição contínua de tensões sobre o pavimento, levando à formação de microfissuras que podem se expandir e comprometer sua resistência. Já a fissuração térmica ocorre devido à contração do pavimento em temperaturas baixas, originando rachaduras longitudinais (ARAÚJO e LIMA, 2024a).

Outro problema recorrente é a desagregação, caracterizada pela perda de agregados na superfície, muitas vezes provocada pelo envelhecimento dos materiais ou pelo uso de ligantes inadequados (Santos, Ferreira, 2020b). O desgaste superficial, além disso, decorre do tráfego constante e das condições climáticas adversas, podendo comprometer a aderência do pavimento e a segurança dos usuários.

Diversos fatores influenciam a degradação dos pavimentos flexíveis, incluindo condições ambientais, tráfego intenso e falhas no processo construtivo. As variações climáticas desempenham um papel crucial nesse contexto, afetando diretamente o comportamento dos materiais e contribuindo para o surgimento de fissuras e redução da resistência (SILVA, SOUZA, 2023a).

Entre os fatores climáticos mais impactantes estão a temperatura e a umidade. Em regiões tropicais, a alternância entre chuvas intensas e alta radiação solar acelera a oxidação do ligante asfáltico, tornando-o mais rígido e suscetível a fissuras e rachaduras (Carvalho, Martins, 2021). A infiltração de água prejudica a coesão entre os agregados e compromete a resistência das camadas inferiores, podendo levar a falhas estruturais mais graves.

O tráfego pesado e constante também representa um desafio significativo para a manutenção dos pavimentos flexíveis. Segundo Pereira et al. (2023a), a repetição de esforços sobre materiais de baixa qualidade ou mal compactados acelera a formação de trilhas de roda, fissuras por fadiga e desagregação da camada de rolamento. Esse cenário é particularmente crítico em zonas industriais, onde a circulação de cargas excede os limites previstos no projeto original do pavimento.

Além dos fatores ambientais e do tráfego intenso, falhas construtivas também afetam a durabilidade dos pavimentos. Problemas como compactação insuficiente

das camadas, espessura inadequada da estrutura e uso de materiais fora das especificações podem comprometer o desempenho do pavimento desde sua execução inicial. Conforme Andrade, Melo (2022), a falta de controle tecnológico durante a construção reduz consideravelmente a vida útil da estrutura, tornando-a mais vulnerável a danos precoces.

Para minimizar essas patologias, é essencial adotar boas práticas de projeto e execução, além de manter a periodicidade da manutenção preventiva. O uso de ligantes modificados por polímeros tem demonstrado eficácia no aumento da resistência à fadiga e à deformação permanente (Gomes, Rezende, 2024). Outra abordagem promissora é a aplicação de misturas recicladas com aditivos rejuvenescedores, que possibilitam a reutilização de materiais sem comprometer a qualidade final do revestimento.

A implementação de sistemas de monitoramento e avaliação contínua, como o Índice de Condição do Pavimento (ICP), representa uma estratégia eficiente para detectar falhas precoces e planejar intervenções adequadas (Oliveira et al., 2023). Esses sistemas possibilitam uma gestão mais assertiva da malha viária, garantindo a aplicação de técnicas de reabilitação mais eficazes.

Além do monitoramento, soluções como o microrevestimento asfáltico e a selagem de trincas vêm ganhando destaque como alternativas acessíveis para preservar a integridade funcional dos pavimentos e retardar a evolução das patologias (SOUZA, LIMA, 2023).

Por fim, a capacitação dos profissionais envolvidos na concepção e manutenção dos pavimentos é fundamental para garantir sua longevidade. A integração entre conhecimento técnico, inovação e planejamento estratégico desempenha um papel crucial na preservação da infraestrutura viária e na segurança das operações em todo o país.

2.2 Método de restauração aplicado em pavimentos flexíveis

A restauração de pavimentos flexíveis pode ser realizada por meio de estratégias preventivas e corretivas que visam aumentar sua durabilidade e desempenho (Silva e Souza, 2023b). No aprimoramento dos materiais, destaca-se a aplicação de ligantes poliméricos, que conferem maior resistência às deformações plásticas e ao envelhecimento precoce. Entre as técnicas de manutenção, a

selagem de fissuras se mostra uma abordagem eficiente, prevenindo a infiltração de água e reduzindo a propagação de rachaduras, prolongando assim a vida útil do pavimento (ARAÚJO e LIMA, 2024b).

Outra alternativa é a aplicação de revestimentos superficiais, que restauram a superfície desgastada e melhoram a aderência, proporcionando maior segurança aos usuários. O monitoramento e o diagnóstico preventivo são igualmente essenciais para a preservação da estrutura viária. Inspeções frequentes possibilitam a detecção antecipada de anomalias, permitindo que ações corretivas sejam tomadas antes da evolução dos danos (Silva e Souza, 2023a). A incorporação de sensores para monitoramento em tempo real auxilia na previsão de falhas e na melhoria dos processos de manutenção (SANTOS e FERREIRA, 2020a).

A gestão eficaz dos pavimentos flexíveis exige conhecimento detalhado das principais anomalias, suas causas e as melhores estratégias para restauração. Estudos recentes indicam que a evolução dos materiais, a adoção de técnicas modernas de manutenção e o uso de tecnologias de monitoramento contribuem significativamente para ampliar a vida útil das infraestruturas viárias (SILVA e SOUZA, 2023b; ARAÚJO e LIMA, 2024a).

Além dessas técnicas, a fresagem seguida de recapeamento é uma solução bastante utilizada na recuperação de pavimentos flexíveis. Esse método consiste na remoção da camada desgastada do revestimento asfáltico e na aplicação de uma nova camada, promovendo melhorias estruturais e funcionais. Conforme Oliveira e Rezende (2022), a fresagem permite corrigir irregularidades superficiais, aumentar a capacidade estrutural do pavimento e restaurar suas características de aderência e rolamento.

O recapeamento Superficial é outra técnica eficaz, aplicada especialmente em áreas de tráfego intenso, como zonas portuárias e industriais. A utilização de misturas asfálticas de granulometria contínua e alto teor de ligante assegura maior resistência à deformação permanente e melhor desempenho em ambientes sujeitos a variações extremas de carga e temperatura (Pereira et al., 2023b). Adicionalmente, a Capa Densa Superficial atua na impermeabilização do pavimento, reduzindo os impactos causados por infiltrações.

Técnicas sustentáveis de restauração também têm ganhado destaque, como a Reciclagem a Frio in situ, que reaproveita os materiais deteriorados do próprio pavimento, incorporando ligantes estabilizantes como emulsões asfálticas ou

cimento. Essa abordagem minimiza custos, reduz a geração de resíduos e diminui o consumo de novos insumos, tornando o processo de reabilitação mais eficiente e sustentável (COSTA e MENDONÇA, 2021).

A eficácia da restauração de pavimentos depende da aplicação de métodos avançados de avaliação do seu desempenho. Isso significa que, para garantir que a restauração seja bem-sucedida e duradoura, é crucial utilizar técnicas modernas e precisas para analisar como o pavimento está se comportando antes, durante e após a intervenção, (GOMES et al., 2024).

Outro aspecto fundamental é a implementação de políticas públicas voltadas para a conservação da infraestrutura viária. Segundo Lima e Barbosa (2023), a ausência de planejamento a longo prazo e a falta de investimentos em manutenção preventiva resultam em custos elevados com restaurações corretivas. Assim, recomenda-se que órgãos gestores adotem programas de gerenciamento de pavimentos (Pavement Management System – PMS), que integram dados técnicos, estratégias de manutenção e critérios de priorização de intervenções com base na criticidade e no desempenho da estrutura.

A capacitação contínua dos profissionais envolvidos no planejamento e execução das restaurações também é essencial. A introdução de novas tecnologias e materiais exige conhecimento atualizado para garantir qualidade na aplicação das técnicas disponíveis. Para isso, cursos de extensão, treinamentos práticos e parcerias entre universidades e empresas de engenharia são fundamentais para aprimorar a gestão da infraestrutura viária (SOUZA e MARTINS, 2022).

A restauração eficiente de pavimentos flexíveis depende de um conjunto articulado de práticas, incluindo o diagnóstico preciso das patologias, o uso de materiais inovadores, a aplicação de técnicas avançadas de reabilitação e a incorporação de tecnologias para monitoramento contínuo. Ao combinar esses fatores com políticas públicas bem estruturadas e investimentos em capacitação profissional, é possível garantir a longevidade dos pavimentos, além de promover segurança e eficiência na mobilidade urbana e logística.

2.2 O Breve histórico do Consórcio Alumar

O Consórcio de Alumínio do Maranhão (Alumar), estabelecido em São Luís, Maranhão, Avenida Engenheiro Emiliano Macieira, Pedrinhas, São Luís – Ma, é uma das maiores operações industriais de produção de alumina e alumínio do mundo. Formado pelas empresas Alcoa, Rio Tinto e South32, o consórcio tem desempenhado um papel significativo no desenvolvimento econômico e social do estado. (ALCOA, 2022).

O empreendimento é composto por três áreas principais: a refinaria, a redução e o porto. A refinaria é responsável pela produção de alumina a partir da bauxita, enquanto a área de redução transforma a alumina em alumínio metálico por meio do processo eletrolítico. Já o porto é utilizado para a movimentação de matérias-primas e insumos essenciais aos processos industriais, além da exportação dos produtos finais. Na Imagem 1, é possível visualizar essas três áreas: refinaria (a), redução (b) e porto (c).

Figura 1 – Áreas da ALUMAR - vista aérea

Imagem a - Redução



Imagem b - Redução



Imagem c - Porto



Fonte: Acevo ALUMAR (2022)

Essas estruturas fazem da ALUMAR um dos maiores complexos de produção integrada de alumínio da América Latina, com significativa relevância econômica e social para a região em que está inserido.

As operações da fábrica da ALUMAR tiveram início em 1983, com a ativação da área portuária, destinada ao desembarque de matérias-primas e insumos essenciais à produção. Já em 1984, foram concluídas as obras das áreas da refinaria e da redução, marcando o início integral das atividades industriais do complexo (ALUMAR, 2023; ALCOA, 2021).

3.1 Estudo de Caso: Demonstração da recuperação dos pavimentos flexíveis na área da redução, refinaria e porto.

O presente trabalho foi realizado no Consórcio Alumar, localizado na Avenida Engenheiro Emiliano Macieira, Pedrinhas, São Luís – Ma. Essa região abriga um importante polo de produção de alumínio, o que contribui para o intenso tráfego de veículos pesados, especialmente caminhões utilizados no transporte de matérias-primas e na distribuição dos produtos finais das indústrias ali instaladas. O tráfego constante e concentrado de cargas elevadas, aliado ao volume diário de operações logísticas, exerce considerável impacto sobre a durabilidade e o desempenho estrutural do pavimento.

Como podemos observar na Figura 2 abaixo, os traçados nas cores destacadas em diferentes cores representam os trechos analisados no estudo, sendo que essas cores têm finalidade apenas ilustrativa, sem associação direta com a gravidade dos defeitos observados.

Figura 2 – Imagem do Consórcio Alumar - vista aérea



Fonte: Adaptado Google Earth Pro (2024) https://www.google.com/maps/@-2.70827,-44.32651,2884m/data=!3m1!1e3?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDYzMCAwIjKXMDSoASAFQAw%3D%3D em 16 set. 2024

As vias que compreendem a maioria da área de estudo estão situadas entre dois acessos pertencentes ao município de São Luís, no estado do Maranhão, Especificamente, a unidade industrial está localizada na região de Pedrinhas, zona rural da capital maranhense, sendo o Porto da Alumar, que faz parte do complexo, também se encontra em São Luís, na confluência do Estreito dos Coqueiros com o Rio dos Cachorros, conforme também indicado na Imagem 2, apresenta-se como o mais comprometido em termos de condições do pavimento.

A estudo foi realizado no período de agosto a setembro de 2024 e teve como objetivo identificar os tipos de restaurações utilizadas nos pavimentos flexíveis nas vias/trechos danificados.

Conforme ilustrado na Imagem 2 acima, as vias destacadas em diferentes cores representam os trechos analisados no estudo, sendo que essas cores têm finalidade apenas ilustrativa, sem associação direta com a gravidade dos defeitos observados. A análise foi realizada em três segmentos principais: o trecho da área da Redução, com 4,73 km de extensão; o da Refinaria, com 7,27 km; e o do Porto até o estacionamento, com 5,58 km que a seguir serão abordados o estado do pavimento nos trechos/vias e a recuperação aplicada.

- **Trecho 01:** traçado na cor verde

O trecho 01 tem uma extensão de aproximadamente 4,73 km. Este trecho apresentou condições do pavimento mais homogênia e também o menor grau de deterioração, predominância de remendos, afundamentos laterais e fissuras. A imagem 3 e 4 mostra o trecho 01, a superfície de avaliação, 966,31m e a imagem 5 mostra a imagem aérea do trecho.

Imagem 3 - Remendo superficial



Fonte: O Autor (2024)

Imagem 4 – Trincas por fadigas e panela



Fonte: O Autor (2024)

Imagem 5 – Imagem do Consórcio Alumar - vista aérea



Fonte: imagem extraída do Google Earth Pro, em 16 set. 2024

- **Trecho 02:** traçado na cor azul

O trecho 02 tem uma extensão de aproximadamente 1 km, fica próximo Lingotes de alumínio, com uma extensão 1.054m, este trecho apresenta maior incidência de remendos e trincas transversais, conforme imagens 6 e 7 e a figura 8 mostra a imagem do trecho.

Imagem 6 – Remendos mal feitos



Fonte: Autoria própria (2024)

Imagem 7 – Trincas vertical



Fonte: Autoria própria (2024)

Imagem 8 – Imagem do Consórcio Alumar - vista aérea



Fonte: imagem extraída do Google Earth Pro, em 16 set. 2024

- **Trecho 03:** traçado na cor amarelo

O trecho 03 tem uma extensão de aproximadamente 960,95m, fica próximo subestação de energia elétrica. A Imagem 8 mostra o trecho com presença significativa de desgaste, remendos e trincas longitudinais, a superfície de avaliação conforme fotos 9 e 10 mostram algumas das degradações encontradas.

Imagem 9 – Desgaste e remendos



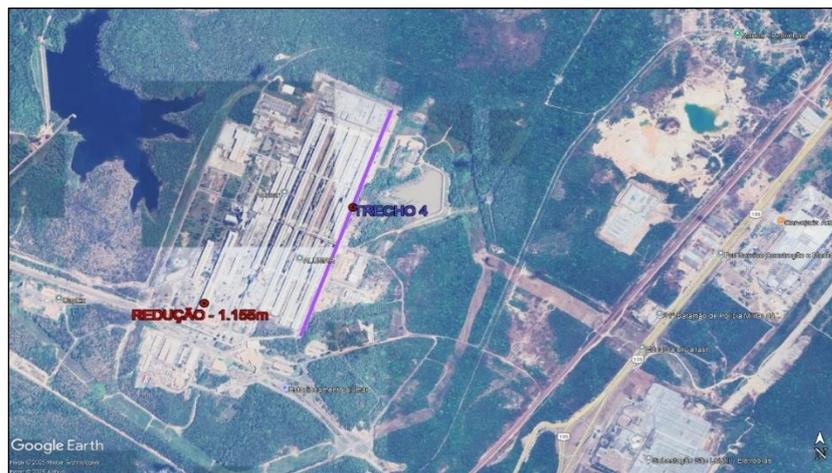
Fonte: Autor própria (agosto de 2024)

Imagem 10 – Trincas Longitudinal



Fonte: Autor própria (agosto de 2024)

Imagem 11 – Imagem do Consórcio Alumar - vista aérea



Fonte: imagem extraída do Google Earth Pro, em 16 set. 2024

- **O trecho 04:** traçado na cor lilás

O trecho 04 tem uma extensão de aproximadamente 1.155m, fica próximo salas de cubas. A Imagem 11 mostra o trecho com presença significativa de predominância de Trincas, remendos e painéis de baixa severidade, a superfície de avaliação conforme fotos 12 e 13 mostram algumas das degradações encontradas.

Imagem- 12-Trincas panelas de baixa severidade



Fonte: Autor própria (setembro de 2024)

Imagem 13 - Desgaste superficial



Fonte: Autor própria (setembro de 2024)

Imagem 14 – Imagem do Consórcio Alumar - vista aérea



Fonte: imagem extraída do Google Earth Pro, em 16 set. 2024

- **O trecho 05:** traçado na cor verde claro

O trecho 05 tem uma extensão de aproximadamente 593,95m, fica próximo salas de cubas. A Imagem 14 mostra o trecho com presença significativa de Ondulações no pavimento flexível, a superfície de avaliação conforme Imagem 12 e 13 mostram algumas das degradações encontradas.

Imagem 15 - Ondulações do pavimento



Fonte: Autor própria (setembro de 2024)

Imagem 16 - Ondulações no asfalto



Fonte: Autor própria (setembro de 2024)

De acordo com estudos técnicos, vias submetidas a tráfego pesado em ambientes industriais tendem a apresentar degradação precoce, manifestando patologias como afundamentos, trincas e perda de material (Costa et al., 2021a; Oliveira et al., 2023). Esse cenário reforça a necessidade de intervenções periódicas e planejadas de manutenção corretiva, visando garantir segurança viária, prolongamento da vida útil do pavimento e eficiência no escoamento da produção (DNIT, 2020; Andrade; Silva, 2022), como mostra a Imagem 15 e 16:

Imagem 17 – Recuperação do trecho 04 - Consórcio Alumar



Fonte: O Autor (setembro de 2024)

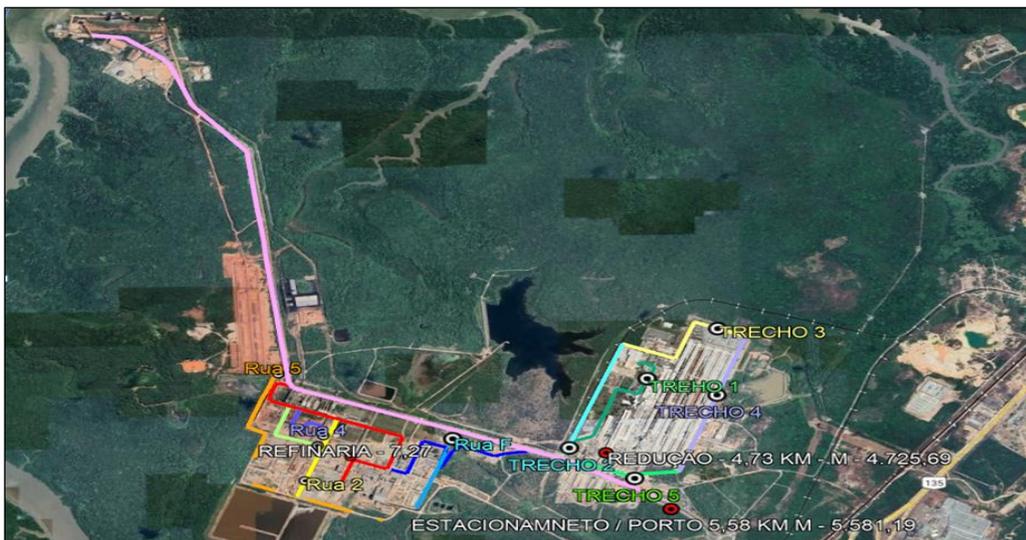
4 Resultados da pesquisa

A área estudada foi subdividida em cinco trechos distintos, trecho 1, trecho 2, trecho 3, trecho 4, trecho 5, com predominância de manifestações patológicas observadas no pavimento. Essas subdivisões foram realizadas para melhor levantamentos no acompanhamento das restaurações.

Foram realizados levantamentos vistorias de natureza técnica de forma a englobar todos as vias/trechos objeto de estudo deste trabalho, conforme imagem 18 abaixo com os seguintes resultados:

- **Trecho 1:** predominância de remendos, afundamentos laterais e fissuras;
- **Trecho 2:** maior incidência de remendos e trincas transversais;
- **Trecho 3:** presença significativa de desgaste, remendos e trincas longitudinais;
- **Trecho 4:** predominância de remendos e desgaste superficial;
- **Trecho 5:** destaque para desgaste e ondulações do pavimento.

Imagem 18 – Imagem do Consórcio Alumar - vista aérea



Fonte: imagem extraída do Google Earth Pro, em 16 set. 2024

4.2.1. Etapas realização do trabalho

4.2.1.1 ETAPA I - Levantamento bibliográfico e embasamento técnico

A fase inicial do trabalho consistiu na realização de uma pesquisa bibliográfica aprofundada, visando compreender os principais conceitos e patologias associadas aos pavimentos flexíveis. Essa etapa é essencial para que o engenheiro responsável esteja devidamente preparado e fundamentado em estudos atualizados, possibilitando a identificação adequada das falhas e a escolha das soluções mais eficazes (Costa et al., 2021a; Andrade; Silva, 2022). O conhecimento prévio sobre os tipos de deterioração e os mecanismos de falha do pavimento contribui significativamente para o sucesso do diagnóstico e da intervenção. Esses tipos de deterioração foram apresentados nos trechos 1,2,4,5.

4.2.3 ETAPA II - Coleta de dados em campo e análise técnica

Nesta etapa, foi realizada a análise das principais manifestações patológicas observadas.

Foram encontradas deteriorações nos trechos 5. A observação dessas ocorrências foi possível por meio de registros fotográficos, conforme observamos nas figuras 19 abaixo:

Escrever a patologia	Remendos, afundamentos laterais e fissuras.
<p style="text-align: center;">Imagem: 19 - Desgaste superficial no pavimento flexível</p> 	
Fonte: Acervo Alumar(2024)	

4.2.3 Terceira etapa – Definição das soluções e técnicas de intervenção

Com base na análise técnica e nos dados coletados, foram propostas medidas corretivas eficazes para a recuperação do pavimento. Considerando as condições específicas do local, em especial, o tráfego intenso de veículos pesados no distrito industrial de São Luís, foram avaliadas técnicas de manutenção e restauração compatíveis com a carga de serviço da via. O objetivo foi garantir a durabilidade da intervenção, promovendo segurança e desempenho operacional adequado (Oliveira et al., 2023). As técnicas de manutenção em vias pavimentadas podem ser classificadas em corretivas e preventivas, com diferentes abordagens para cada caso. A manutenção corretiva visa reparar danos existentes, como buracos e trincas, enquanto a preventiva busca evitar o surgimento de problemas, como a selagem de trincas e o recapeamento.

O revestimento é a camada superior do pavimento, sendo responsável por suportar diretamente as ações do tráfego. Além de distribuir as cargas para as camadas inferiores, o revestimento proporciona conforto e segurança aos usuários da via, além de proteger as camadas estruturais contra a ação da água e das intempéries. Pode ser composto por misturas asfálticas usinadas a quente, como o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), ou outros tipos de revestimentos conforme o tipo de uso da via (DNIT, 2020; COSTA et al., 2021b).

Figura 20 – Degradações, Trincas, buracos e remendos



Fonte: Acervo Alumar (setembro de 2024)

Conforme a figura 20, ilustra uma via urbana com diversas áreas cobertas por remendos superficiais, técnica comum utilizada na manutenção corretiva de pavimentos flexíveis. Os blocos escuros contrastando com o pavimento original evidenciam intervenções recentes em múltiplos pontos que apresentavam degradações, como trincas, buracos ou desagregações superficiais. A aplicação do remendo superficial visa restaurar temporariamente a integridade funcional da via, proporcionando maior segurança e conforto aos usuários, ainda que sem resolver profundamente as causas das falhas.

Entretanto, observa-se que os remendos são irregulares e múltiplos, indicando falhas recorrentes e possivelmente ausência de manutenção preventiva eficaz. A presença de muitas áreas remendadas em um mesmo trecho também pode indicar que o pavimento já se encontra com vida útil comprometida, sendo necessária uma avaliação mais ampla para verificar a viabilidade de intervenções mais duradouras, como recapeamento ou reconstrução estrutural. Segundo Costa et al. (2021a) e Santos, Ferreira (2024), o uso contínuo de remendos superficiais pode

mascarar problemas estruturais profundos, principalmente quando não há análise técnica prévia das causas de deterioração.

Além disso, estudos atuais destacam a importância da execução técnica correta do remendo superficial, como limpeza da área, aplicação de pintura de ligação e compactação adequada, para garantir maior durabilidade da intervenção (Oliveira et al., 2022). Intervenções mal executadas, como bordas mal seladas ou ausência de nivelamento, tendem a permitir infiltração de água, o que favorece o surgimento de novas falhas em pouco tempo.

Deste modo, torna-se mais fácil dimensionar a vida útil do pavimento e seu estado atual, além de prever as manutenções que devem ser feitas antes que precise de reparos mais invasivos.

Imagem 21 – Asfalto quebrado.



Fonte: O Autor (setembro2024).

A Imagem 21 evidencia um trecho de via pavimentada com asfalto visivelmente deteriorado, apresentando rachaduras, desagregações e acúmulo de água pluvial. Essa condição é típica de patologias em pavimentos flexíveis causadas por uma combinação de ações de intempéries (chuvas frequentes e variações térmicas) e falhas construtivas, especialmente a deficiência na compactação das camadas inferiores, como o subleito ou sub-base.

A presença de poças de água evidencia o problema da drenagem inadequada e potencializa os danos ao pavimento, uma vez que a infiltração da água pelas trincas acelera o processo de erosão das camadas internas e compromete a sua estrutura de forma progressiva. A ação da água, aliada ao tráfego pesado recorrente

em áreas industriais, como indicado no estudo de caso, agrava ainda mais os efeitos das fissuras, afundamentos e deformações plásticas (DNIT, 2020).

Segundo estudos recentes, o baixo grau de compactação e a má execução das camadas de base e sub-base são os principais fatores que favorecem o surgimento precoce de manifestações patológicas em pavimentos flexíveis (Silva, Santos, 2021). A negligência quanto à preparação adequada do solo e à impermeabilização do sistema pode comprometer a durabilidade da via e exigir intervenções corretivas frequentes, como o remendo profundo ou até a reconstrução total da estrutura.

Imagem 22 – Desgaste superficial



Fonte: O Autor (setembro2024).

A Imagem 22 apresentada ilustra um trecho de pavimento com visível desgaste superficial, fenômeno comum em vias submetidas a ações climáticas intensas e tráfego constante, especialmente em ambientes industriais como o da Imagem. Observa-se a ausência de revestimento asfáltico em diversos pontos, o que indica desagregação da camada superficial do pavimento, provavelmente provocada por variações de temperatura, ação da umidade e envelhecimento natural do ligante asfáltico.

Segundo Lima et al. (2022), o desgaste superficial pode ocorrer devido à oxidação do ligante betuminoso, que com o tempo perde sua flexibilidade e aderência aos agregados, tornando a superfície vulnerável à ação da água, vento e tráfego. Em regiões com clima tropical úmido, como São Luís do Maranhão, esses efeitos são agravados pela presença de chuvas intensas e alta umidade, que

aceleram o processo de degradação. Além disso, em áreas industriais com trânsito de veículos pesados, a ação mecânica intensifica o processo de desgaste.

A ausência de manutenção preventiva e de selagem adequada favorece a penetração de água nas camadas inferiores, o que pode gerar fissuras, trincas e até falhas estruturais, comprometendo a durabilidade e a segurança do pavimento. A adoção de técnicas corretivas como a fresagem e aplicação de novas camadas de revestimento ou o uso de selantes pode restaurar as características funcionais da via e prolongar sua vida útil (FERREIRA et al., 2023a).

Imagem 23 / 24 – Painelas e buracos.



Fonte: O Autor (setembro de 2024)

As Imagem 23 e 24 mostram claramente um pavimento flexível deteriorado, com evidência de fissuras e afundamentos superficiais, problemas típicos em vias de tráfego pesado e exposição prolongada a condições climáticas adversas. Esse tipo de desgaste, principalmente em áreas industriais, resulta do intenso fluxo de veículos pesados, que aplicam pressões mecânicas excessivas sobre a estrutura do pavimento, acelerando a degradação do asfalto (SILVA et al., 2021b).

Além disso, as intempéries, como chuvas frequentes e variações térmicas, contribuem significativamente para a deterioração do ligante betuminoso, reduzindo a aderência entre os agregados e favorecendo a formação de trincas e buracos.

Estudos recentes apontam que a falta de manutenção preventiva e a ausência de selagem adequada nas áreas mais comprometidas do pavimento são fatores cruciais para a aceleração do desgaste (Costa, Souza, 2023). Em locais como o distrito industrial de São Luís do Maranhão, a combinação de alto tráfego de caminhões, má compactação do solo e o impacto das condições climáticas agrava ainda mais a situação. A solução para esse tipo de falha, segundo especialistas,

passa por intervenções corretivas, como a aplicação de remendos superficiais ou fresagem da área afetada, seguidas de uma nova camada de revestimento asfáltico, de modo a garantir maior durabilidade e segurança viária (SANTOS et al., 2022a).

Imagem 25 - Presença de panelas e buraco na via de acesso



Fonte: O Autor (setembro2024).

Conforme a Imagem 25, a mesma apresentada revela um pavimento flexível em mau estado de conservação, com trincas e desagregações evidentes, típicas de falhas em vias com tráfego intenso de veículos pesados. A deterioração do pavimento é uma consequência comum de cargas mecânicas repetitivas e das condições climáticas adversas, como chuvas frequentes e variações térmicas, que impactam negativamente a estrutura do pavimento, principalmente em áreas industriais (Santos et al., 2022b). O desgaste prematuro é agravado pela falta de manutenção preventiva e pela infiltração de água, que compromete a aderência entre os agregados e acelera a degradação do ligante asfáltico.

A manutenção adequada do pavimento é fundamental para evitar deteriorações graves, como afundamentos e ondulações. Estudos recentes indicam que a intervenção corretiva, por meio da recomposição asfáltica e remendos superficiais, é uma solução eficaz para restaurar as características de segurança e durabilidade das vias. A aplicação de técnicas como a fresagem da área afetada e recapeamento são essenciais para garantir a estabilidade do pavimento, levando em consideração a intensidade do tráfego pesado e as condições climáticas locais, comuns em regiões como o distrito industrial de São Luís do Maranhão (FERREIRA et al., 2023b).

Imagem 26 - Asfalto quebrado na borda da via



Fonte: O Autor (setembro2024).

A Imagem 26 apresentada mostra um pavimento flexível com evidentes falhas estruturais, incluindo trincas e afundamentos resultantes de tráfego intenso e exposição prolongada a condições climáticas adversas, características comuns em áreas industriais. O tráfego de veículos pesados, como caminhões e máquinas, gera altas cargas mecânicas, que, juntamente com o impacto da umidade e as variações térmicas, comprometem a durabilidade do pavimento. A degradação do asfalto ocorre quando o ligante betuminoso, utilizado na camada superficial, perde suas propriedades devido ao envelhecimento e à exposição constante à água e ao sol (SILVA et al., 2021a).

Diante de tais condições, é necessário realizar intervenções corretivas rápidas e eficazes, como o remendo superficial e o recapeamento, para restaurar a segurança e a funcionalidade do pavimento. Estudos recentes enfatizam que essas ações são essenciais para garantir a continuidade da operação das vias, sem prejudicar a mobilidade e segurança dos veículos (FERREIRA et al., 2023a).

Além disso, a manutenção preventiva regular, que envolve a inspeção periódica e a aplicação de selantes, é crucial para evitar que pequenas falhas se transformem em danos mais graves, que possam demandar reparos mais caros e complexos (LIMA, COSTA, 2022).

Imagem 27 / 28 - Fresagem de asfalto em operação



Fonte: O Autor (setembro2024).

Consoante as Imagem 27 / 28, este tipo de fresagem, toda a espessura do pavimento é removida, geralmente com uma profundidade de mais de 5 cm. É utilizada quando o pavimento existente está danificado, deteriorado ou não atende mais aos requisitos de projeto, sendo necessário remover toda a camada de asfalto antes de aplicar uma nova camada.

O pavimento flexível é uma solução amplamente utilizada em vias com tráfego intenso, como as rodovias e áreas industriais. Contudo, devido ao alto tráfego de veículos pesados e à exposição prolongada a condições climáticas adversas, esses pavimentos podem sofrer deterioração ao longo do tempo, o que compromete a sua durabilidade e segurança (SILVA et al., 2022).

Um dos principais problemas é a degradação da camada superficial, que pode resultar em fissuras, ondulações e buracos. Este tipo de desgaste é amplificado pela ação das variações de temperatura e da umidade, que enfraquecem o ligante betuminoso responsável por manter a coesão dos agregados (FERREIRA et al., 2023b).

A recuperação de pavimentos flexíveis pode ser feita por meio de remendos superficiais, que são uma solução eficiente para áreas com falhas localizadas. Esses remendos podem ser aplicados quando o dano não afeta a estrutura do pavimento de forma profunda, e a intervenção consiste basicamente em remover a camada danificada e aplicar novos materiais asfálticos, visando restaurar as propriedades de resistência e aderência do pavimento (LIMA, COSTA, 2022).

Estudos recentes apontam que a realização de inspeções periódicas e intervenções preventivas podem reduzir consideravelmente os custos com manutenção a longo prazo, além de aumentar a segurança viária e a durabilidade do pavimento (SANTOS et al., 2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A restauração de pavimentos flexíveis na área de estudo do presente trabalho Consórcio Alumar, “Redução, Refinaria e Porto abordou a identificação das patologias nos pavimentos flexíveis e os tipos de recuperações aplicadas nas vias/trechos objeto de estudo.

Foi verificado que nas vias/trechos o pavimento encontrava-se sob efeito das ações do tráfego, e nas suas condições climáticas. Dano, deterioração, degradação são nomes possíveis para descrever o processo de perda de qualidade estrutural e funcional dos pavimentos flexíveis. Os tipos de restaurações aplicadas nas vias/trechos foi fresagem e recapeamento estruturais visam aumentar a capacidade de carga do pavimento, enquanto as funcionais buscam corrigir defeitos superficiais e melhorar o conforto e a segurança da via. O manual do DENIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) estabelece diretrizes e procedimentos para a manutenção de rodovias federais. Ele abrange desde a limpeza da faixa de domínio e controle da vegetação até a conservação de dispositivos de drenagem e pavimentos. O manual enfatiza a importância da manutenção preventiva e corretiva para garantir a segurança e durabilidade das vias. A principais recomendações, limpeza da faixa de domínio, controle de vegetação, manutenção da drenagem e manutenção de obras de arte especiais. Por fim, recomenda-se que as inspeções nessas vias/trechos do consórcio Alumar sejam realizadas manutenções preventivas regulares e controle constante do desempenho dos pavimentos restaurados para maximizar durabilidade e otimização de investimento em manutenção.

REFERÊNCIAS

ALCOA. **Sustentabilidade e atuação no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://www.alcoa.com/brasil/pt>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ALUMAR. **História e operações**. São Luís: Consórcio de Alumínio do Maranhão, 2023. Disponível em: <https://www.alumar.com.br>. Acesso em: abr. 2025.

ANDRADE, F.L.; LIMA, G.R. Camadas estruturais do pavimento flexível: desempenho e caracterização. **Revista de Engenharia Rodoviária**, v. 8, n. 1, p. 40–52, 2021.

ANDRADE, F.L.; SILVA, T.R. Pavimentação em áreas industriais: impactos do tráfego pesado e estratégias de manutenção. **Engenharia Civil em Foco**, v. 12, n. 1, p. 22–39, 2022.

ANDRADE, M.H.; MELO, R.T. Falhas construtivas em pavimentação asfáltica: causas e consequências. **Revista Infraestrutura Urbana**, v. 14, n. 2, p. 82–95, 2022.

ARAÚJO, A.; LIMA, B.E. Diagnóstico e soluções para fissuração térmica em pavimentos flexíveis. **Revista de Engenharia Civil**, v. 2, p. 45-60, 2024a.

ARAÚJO, L.F.; LIMA, D.S. Análise de fissuração térmica em pavimentos flexíveis: causas e soluções. **Revista Brasileira de Engenharia de Transportes**, v. 10, n. 1, p. 55–67, 2024b.

ARAÚJO, L. M.; COSTA, F. R.; BARROS, M. A. Avaliação do desempenho de recapeamentos asfálticos em ambientes industriais com tráfego pesado. **Revista Engenharia Civil em Debate**, v. 12, n. 1, p. 45–59, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **Alumar anuncia retomada da capacidade total de produção de alumínio até 2023**. 2022. Disponível em: <https://abal.org.br/noticia/alumar-anuncia-retomada-da-capacidade-total-de-producao-de-aluminio-ate-2023/>. Acesso em: 10 abr. 2025.

BRASIL61. **Consórcio Alumar celebra investimento de R\$ 3 bilhões no Maranhão**. 2023. Disponível em: <https://brasil61.com/n/consorcio-alumar-celebra-investimento-de-r-3-bilhoes-no-maranhao-mine230564>. Acesso em: 11 abr. 2025.

CARVALHO, E. A.; MARTINS, J. S. Efeitos climáticos na degradação de pavimentos flexíveis em regiões tropicais. **Revista Clima & Engenharia**, v. 6, n. 1, p. 41–56, 2021.

CARVALHO, V.A.; GOMES, D.C.; MENDES, S.S. Estudo comparativo entre pavimentação flexível e rígida em zonas urbanas: análise de custos e durabilidade. **Revista de Infraestruturas e Transporte**, v. 13, n. 1, p. 112-124, 2025.

CONTEXTUALIZANDO BLOG. **Alumar investe na qualificação de comunidades vizinhas e forma mais de 100 pessoas em cursos profissionalizantes**. 2025.

Disponível em: <https://contextualizando.blog/2025/01/07/alumar-investe-na-qualificacao-de-comunidades-vizinhas-e-forma-mais-de-100-pessoas-em-cursos-profissionalizantes/>. Acesso em: 12 abr. 2025.

COSTA, C.; OLIVEIRA, D. Análise do desgaste superficial em rodovias: causas e medidas mitigadoras. **Revista Brasileira de Infraestrutura Viária**, v. 1, p. 75-89, 2021.

COSTA, L.S.; SOUZA, T.P. Impacto do tráfego pesado e clima tropical na degradação de pavimentos asfálticos. **Revista Brasileira de Engenharia de Pavimentação**, v. 7, n. 2, p. 30–45, 2023.

COSTA, M.A.R. da et al. Diagnóstico e técnicas de recuperação de pavimentos asfálticos urbanos. **Revista Brasileira de Engenharia de Infraestrutura**, v. 6, n. 2, p. 45–60, 2021a.

COSTA, M.A.R. da et al. Técnicas de manutenção de pavimentos urbanos: estudo de caso em remendos superficiais. **Revista Brasileira de Engenharia de Infraestrutura**, v. 6, n. 2, p. 45–60, 2021b.

COSTA, R.M.; MENDONÇA, V.L. Técnicas sustentáveis para reabilitação de pavimentos: reciclagem a frio como alternativa viável. **Revista Engenharia & Sustentabilidade**, v. 8, n. 2, p. 101–115, 2021.

COSTA, R.M.; OLIVEIRA, F.C. Estudo sobre a formação de trilhas de roda em pavimentos flexíveis. **Revista de Infraestrutura e Pavimentação**, v. 11, n. 3, p. 98–112, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de restauração de pavimentos flexíveis**. 4. ed. Brasília: DNIT, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. 4. ed. Brasília: DNIT, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit>. Acesso em: abr. 2025.

FERRARI, R.R. Desempenho estrutural de pavimentos flexíveis submetidos a cargas cíclicas. **Revista de Infraestrutura e Transporte**, v. 9, n. 3, p. 89–102, 2020.

FERREIRA, A.C. M. et al. Degradação de pavimentos: influência do envelhecimento do ligante asfáltico e da exposição a intempéries. **Revista Brasileira de Pavimentação**, v. 10, n. 2, p. 65–79, 2023a.

FERREIRA, A.C.M. et al. Manutenção e recuperação de pavimentos asfálticos: estudo de casos e soluções eficientes. **Cadernos de Engenharia Civil**, v. 10, n. 1, p. 45–60, 2023b.

FERREIRA, D.T.; SILVA, A.P. Avaliação da eficiência econômica da pavimentação flexível para rodovias de tráfego intenso. **Engenharia de Transportes e Infraestruturas**, v. 22, n. 1, p. 65-77, 2022.

FREITAS, P.M. **Manual de Pavimentação: Fundamentos e Técnicas**. São Paulo: Editora Universidade, 2019.

GOMES, C.L.; REZENDE, T.P. Aplicação de ligantes modificados por polímeros em misturas asfálticas: desempenho e durabilidade. **Revista Técnica de Engenharia Civil**, v. 9, n. 2, p. 69–84, 2024.

GOMES, P.H.; ALVES, F.B.; NASCIMENTO, T.P. Inteligência artificial na gestão de pavimentos: novas fronteiras para a manutenção rodoviária. **Revista Tecnologia em Infraestrutura**, v. 6, n. 4, p. 44–60, 2024.

GONÇALVES, A.R.; MARTINS, C.L.; FERREIRA, P.M. Pavimentos asfálticos: desempenho e manutenção em áreas de tráfego severo. **Revista Brasileira de Infraestrutura e Transportes**, v. 8, n. 2, p. 77–91, 2020.

IMIRANTE. **Alumar retoma produção de alumínio no Maranhão e viabiliza mais de 2.500 pontos de trabalho**. 2022. Disponível em: <https://imirante.com/noticias/sao-luis/2022/04/27/alumar-retoma-producao-de-aluminio-no-maranhao-e-viabiliza-mais-de-2500-pontos-de-trabalho>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LIMA, F.R. et al. Avaliação do desgaste superficial em pavimentos flexíveis expostos ao clima tropical úmido. **Revista de Engenharia Civil e Infraestrutura**, v. 8, n. 1, p. 20–35, 2022.

LIMA, F.R.; COSTA, J. P. Pavimentos urbanos e industriais: desafios e soluções para prolongamento da vida útil. **Revista Brasileira de Engenharia de Pavimentação**, v. 9, n. 3, p. 79–93, 2022.

LIMA, J.A.; ALMEIDA, V.F. Avaliação do afundamento local em pavimentos industriais: causas e soluções. **Revista Técnica de Engenharia de Estradas**, v. 7, n. 2, p. 120–134, 2022.

LIMA, J.A.; BARBOSA, C.M. Políticas públicas e conservação da malha viária no Brasil: desafios e soluções. **Revista Planejamento e Infraestrutura**, v. 12, n. 3, p. 72–88, 2023.

LIMA, J.S.; SANTOS, F.R. Tecnologias de monitoramento aplicadas à manutenção de pavimentos flexíveis. **Revista Tecnologia em Construção**, v. 19, n. 1, p. 34–49, 2023.

MACHADO, G.P.; SANTOS, E.C.; VIEIRA, C.L. Aspectos técnicos e financeiros na escolha entre pavimentos rígidos e flexíveis em rodovias. **Journal of Road Engineering and Maintenance**, v. 14, n. 4, p. 259-273, 2024.

MARANHÃO HOJE. **Consórcio Alumar comemora 41 anos de implantação e 25 anos do seu parque ambiental**. 2025. Disponível em: <https://maranhaohoje.com/consorcio-alumar-comemora-41-anos-de-implantacao-e-25-anos-do-seu-parque-ambiental/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

MELO, C.F.; RODRIGUES, D.L. Aplicação de tecnologias sustentáveis em pavimentos asfálticos: estudo de caso em refinarias. **Revista de Engenharia Sustentável**, v. 7, n. 1, p. 75–90, 2023.

OLIVEIRA, F.S.; REZENDE, T.M. Fresagem e recapeamento: análise técnica e econômica na restauração de pavimentos urbanos. **Revista Técnica de Engenharia Civil**, v. 7, n. 2, p. 33–47, 2022.

OLIVEIRA, M.C. et al. Avaliação do desempenho de remendos superficiais em pavimentos asfálticos: aplicação em áreas industriais. **Revista Transportes**, v. 33, n. 1, p. 22–38, 2022.

OLIVEIRA, M.C.; FERREIRA, D.S. Dimensionamento e execução de sub-bases granulares: estudo de casos em vias industriais. **Revista Transportes**, v. 35, n. 1, p. 65–80, 2022.

OLIVEIRA, M. L.; MENDES, D. P. Camadas estruturais de pavimentos flexíveis: dimensionamento e comportamento frente ao tráfego pesado. **Revista de Engenharia Civil e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 55-68, 2023.

OLIVEIRA, P.S.; CAVALCANTI, R.R. Degradação e recuperação de pavimentos: um estudo de caso em áreas industriais. **Cadernos de Engenharia Rodoviária**, v. 12, n. 2, p. 72–88, 2021.

OLIVEIRA, R.P. et al. Avaliação técnica de pavimentos em áreas industriais: estudo de caso em complexo portuário. **Revista Transportes**, v. 33, n. 4, p. 55–72, 2023.

OLIVEIRA, V.H.; MENDES, T.A. Fatores críticos para o desempenho de pavimentos em áreas industriais. **Revista de Engenharia e Estrutura**, v. 15, n. 2, p. 63–78, 2022.

PEREIRA, D.C.; NASCIMENTO, M.J.; FREIRE, A.L. Impacto do tráfego pesado na degradação de pavimentos flexíveis. **Revista Transportes & Logística**, v. 20, n. 2, p. 47–62, 2023a.

PEREIRA, D.C.; SOUZA, M.R.; TAVARES, L.F. Revestimento asfáltico com Capa Densa Superficial em vias industriais: estudo de caso e análise de desempenho. **Revista Brasileira de Infraestrutura**, v. 9, n. 1, p. 25–40, 2023b.

PEREIRA, J.S.; SANTOS, L.M. Avaliação estrutural da base de pavimentos flexíveis em áreas de tráfego pesado. **Caderno Técnico de Engenharia Civil**, v. 10, n. 2, p. 18–36, 2024.

RIO TINTO. **Relatório de Sustentabilidade 2024**. Disponível em: <https://www.riotinto.com>. Acesso em: 16 abr. 2025.

- SANTOS, J.M. et al. Análise de patologias em pavimentos urbanos: causas, diagnóstico e soluções. **Revista Brasileira de Pavimentação**, v. 10, n. 3, p. 34–50, 2022a.
- SANTOS, J.M. et al. Estratégias de manutenção em pavimentos de alta resistência. **Revista de Engenharia e Infraestrutura**, v. 14, n. 4, p. 112–126, 2021.
- SANTOS, J.R. et al. Alternativas para recuperação de pavimentos flexíveis: remendos superficiais e recapeamento. **Revista de Engenharia Rodoviária**, v. 11, n. 1, p. 15–27, 2022b.
- SANTOS, J.; FERREIRA, R. Fatores determinantes na orientação precoce de pavimentos asfálticos. **Revista de Engenharia de Transportes**, v. 1, p. 35-50, 2020a.
- SANTOS, L.M.; FERREIRA, D.T. Manutenção corretiva de pavimentos: o papel do remendo superficial na gestão de infraestrutura viária. **Revista de Engenharia Rodoviária**, v. 7, n. 3, p. 70–85, 2024.
- SANTOS, V.M.; FERREIRA, R.L. Patologias em pavimentos flexíveis: identificação, causas e métodos de correção. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 8, n. 2, p. 33–50, 2020b.
- SILVA, R. F. da; COSTA, A. C.; BARBOSA, J. M. Desempenho estrutural de pavimentos flexíveis em vias urbanas: uma abordagem técnica e funcional. **Revista Transportes**, v. 29, n. 1, p. 1-15, 2021.
- SILVA, A.R.; GOMES, R.T.; SOUSA, E.P. **Análise e Restauração de Pavimentos Flexíveis em Áreas Industriais**. São Luís: Editora Acadêmica, 2021.
- SILVA, H.T.; SOUZA, P.A. Influência das condições ambientais na durabilidade de pavimentos flexíveis. **Revista de Geotecnia e Pavimentação**, v. 6, n. 1, p. 88–103, 2023a.
- SILVA, M.A. et al. Patologias em pavimentos flexíveis: análise de causas e soluções de manutenção. **Cadernos de Engenharia e Infraestrutura**, v. 12, n. 3, p. 53–70, 2021a.
- SILVA, M.A. et al. Patologias em pavimentos flexíveis: identificação e soluções de manutenção. **Revista de Engenharia Rodoviária**, v. 8, n. 2, p. 15–28, 2021.
- SILVA, M.; SOUZA, P. Estratégias de manutenção preditiva para pavimentos flexíveis. **Revista de Inovação em Infraestrutura**, v. 5, p. 90-105, 2023b.
- SILVA, T.R.; ALMEIDA, H.L.; PEREIRA, D.C. Desempenho de pavimentos em áreas industriais: estudo de caso nas instalações da Alumar. **Revista Brasileira de Pavimentação**, v. 16, n. 4, p. 102–117, 2021b.

SOUTH32. *Environmental initiatives in Latin America*. 2022. Disponível em: <https://www.south32.net>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SOUZA, D.M.; MARTINS, E.C. Formação continuada em infraestrutura urbana: o papel da qualificação técnica na gestão de pavimentos. **Revista Ensino & Engenharia**, v. 11, n. 3, p. 59–72, 2022.

SOUZA, E.P.; BARRETO, R.M. Planejamento e manutenção de pavimentos industriais: estratégias e desafios. **Revista de Engenharia Aplicada**, v. 10, n. 3, p. 118–134, 2021.

SOUZA, J.A. **Gestão e infraestrutura de pavimentação**: impactos logísticos e industriais. São Paulo: Editora Logística Moderna, 2025a.

SOUZA, J.A. **Sustentabilidade na engenharia de pavimentação**. Rio de Janeiro: Editora Ambiental, 2025b.

SOUZA, M.P.; LIMA, T.F. Técnicas de manutenção preventiva para pavimentos urbanos. **Revista Engenharia e Cidades**, v. 11, n. 3, p. 59–74, 2023.

SOUZA, R.P. et al. Técnicas de reforço do subleito em solos de baixa resistência. **Revista Geotecnia Aplicada**, v. 14, n. 2, p. 33–48, 2023.

TOLEDO, I.C.; CORREA, A.L.S.C.; JORGE, G.X. Estudo de caso de patologias em pavimentos flexíveis: diagnóstico em uma rodovia a partir de avaliação visual no perímetro urbano de uma cidade no interior do Paraná. **Journal of Exact Sciences – JES**, v. 34, n.1, p. 13-18, jul. /set. 2022.