

Um Estudo de Caso: Dimensionamento e Análise de Viabilidade de Pavimento Rígido para Pátio de Contêineres na Amazônia

VICTOR EMANOEL JORGE DE OLIVEIRA

*Undergraduate Student in Civil Engineering
Universidade Nilton Lins, Manaus, AM, Brazil*

ANDRÉ LOPES TEIXEIRA

*Professor, Universidade Nilton Lins, Manaus, AM, Brazil
Master in Materials Engineering – PPGCEM/UFAM*

Resumo

Este artigo apresenta uma análise aprofundada do dimensionamento e da especificação técnica de um pavimento rígido de concreto, projetado para solicitações de sobrecargas de um pátio de contêineres em um Centro de Operações Logísticas na Amazônia. A pesquisa, configurada como um estudo de caso sobre o dimensionamento estrutural, busca incorporar uma detalhada análise geotécnica do subleito, estudos de sensibilidade dos parâmetros de projeto, uma avaliação comparativa de Custo de Ciclo de Vida (ACCV) e uma discussão sobre os desafios executivos aplicáveis ao contexto amazônico. O dimensionamento, baseado no método da Portland Cement Association (PCA) de 1984 e em uma criteriosa investigação geotécnica que definiu um CBR de projeto de 12%, resultou em uma placa de concreto armado de 15 cm sobre uma sub-base de solo-cimento de 15 cm. As análises complementares demonstraram adequação estrutural da solução para uma vida útil de 20 anos, assim como a variação dos parâmetros de entrada e viabilidade econômica em longo prazo. Portanto, a abordagem abrangente do projeto integra aspectos técnicos, econômicos e executivos, por sua vez, é fundamental para garantir a durabilidade e a sustentabilidade de infraestruturas logísticas críticas.

Palavras-chave: Pavimento Rígido, Dimensionamento de Pavimentos, Custo de Ciclo de Vida, Engenharia Geotécnica, Engenharia na Amazônia.

1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura viária na região amazônica enfrenta desafios singulares, decorrentes de um subsolo predominantemente argiloso, um regime pluviométrico intenso e a crescente demanda do tráfego de veículos pesados, especialmente em polos industriais como o de Manaus. Tais condições impõem, inegavelmente, severas limitações ao desempenho de soluções de pavimentação convencionais. Nesse cenário adverso, os pavimentos flexíveis frequentemente exibem uma vida útil reduzida, manifestando patologias como afundamentos e fissuração prematura, o que resulta em custos elevados de manutenção e interrupções operacionais. A necessidade de garantir elevados índices de produtividade e resiliência impulsionou, consequentemente, a busca por soluções de engenharia mais duradouras e de alto desempenho (BALIEIRO, 2015).

Nesse contexto, o pavimento rígido, constituído por placas de concreto de cimento Portland, apresenta-se como uma alternativa tecnicamente superior. A

principal vantagem desta solução reside em sua elevada rigidez, que permite a distribuição das cargas sobre uma área mais ampla do subleito, absorvendo a maior parte das tensões e minimizando as deformações nas camadas inferiores (BALBO, 2007). Essa característica confere ao pavimento rígido uma longevidade superior, tornando-o ideal para corredores de tráfego pesado e canalizado, como terminais logísticos e pátios industriais (GIUBLIN et al., 2010).

Este estudo detalha o estudo de caso do pátio de contêineres em um Centro de Operações Logísticas na Amazônia, estruturando a análise em quatro eixos metodológicos complementares que, juntos, oferecem uma avaliação integral do projeto. O primeiro eixo consiste na análise geotécnica, que estabelece a base do projeto ao caracterizar o subleito. O segundo eixo foca no dimensionamento estrutural, aplicando a metodologia da PCA/84 para determinar a espessura da placa de concreto. Como terceiro eixo, realiza-se uma Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV) para quantificar a viabilidade econômica da solução em longo prazo. Por fim, o quarto eixo compreende a análise de sensibilidade, que afere o impacto das variações nos parâmetros sobre a segurança da estrutura, identificando os pontos críticos para o controle tecnológico. Sendo assim, o objetivo é apresentar um estudo que, ao integrar essas quatro perspectivas, sirva como um referencial metodológico completo para projetos de infraestrutura em condições similares.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seleção de uma tipologia de pavimento para áreas industriais depende de uma análise que engloba desempenho mecânico, durabilidade e viabilidade econômica. O pavimento de concreto destaca-se por sua capacidade de resistir a cargas concentradas e estáticas de alta magnitude, distribuindo as tensões por meio da elevada rigidez à flexão de suas placas (SOUTHGATE; DEEN, 1984). O dimensionamento dessas estruturas evoluiu para métodos mecanístico-empíricos, como o da Portland Cement Association (PCA) de 1984, que se fundamenta na análise de dois mecanismos de ruína: a fadiga do concreto, por repetição de tensões de tração, e a erosão da fundação, associada ao fenômeno de bombeamento.

A longevidade de um pavimento de concreto é garantida pela sinergia entre o dimensionamento, o projeto, os materiais e a execução. A literatura de engenharia de pavimentos enfatiza a importância de um sistema de fundação estável, frequentemente obtido com sub-bases cimentadas que aumentam a capacidade de suporte e previnem o bombeamento. Adicionalmente, a decisão pela tipologia de pavimento se torna mais racional quando apoiada por uma Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV), uma ferramenta que compara o dispêndio total de diferentes alternativas ao longo de suas vidas úteis (WALLS III; SMITH, 1998).

Por fim, reconhecer que a materialização do desempenho previsto em projeto depende de um rigoroso controle tecnológico durante a construção. Para estruturas de concreto, especialmente em climas quentes e úmidos como o amazônico, o controle da tecnologia do concreto é crucial para mitigar patologias e garantir que as resistências especificadas sejam atingidas (NEVILLE; BROOKS, 2010). Em suma, a ausência desse controle pode anular os benefícios de um projeto bem elaborado, comprometendo a durabilidade da estrutura.

A presença de solos com baixa capacidade de suporte, comuns em contextos geotécnicos desafiadores como o da região amazônica, representa uma condicionante

crítica para o desempenho de pavimentos rígidos. Esses materiais, frequentemente caracterizados por elevada umidade e susceptibilidade a variações volumétricas, podem induzir recalques diferenciais e a perda de suporte contínuo sob as placas de concreto armado, resultando na fissuração prematura da estrutura (PINTO, 2006). Como evidência da evolução técnica no setor, pesquisadores da área de geotecnia e pavimentação demonstram que a estabilização de solos com agentes cimentícios, como cimento Portland ou cal, se apresenta como uma solução consolidada para mitigar essas vulnerabilidades. Ademais, uma análise aprofundada indica que essa intervenção eleva a capacidade de suporte do subleito e cria uma camada de transição com rigidez controlada, que melhora a distribuição de tensões e reduz o potencial de bombeamento (MEDINA; MOTTA, 2015). A combinação desta solução com a fase executiva é, portanto, fundamental, ligando a eficácia do projeto geotécnico à necessidade de um controle tecnológico rigoroso em campo.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho configura-se como um estudo de caso de natureza qualitativa e descritiva, focado na análise aprofundada da documentação técnica de um projeto de pavimentação industrial executado em Manaus, Amazonas. A base documental para esta investigação inclui o memorial descritivo, os resultados das investigações geotécnicas, as pranchas do projeto estrutural e executivo, e os relatórios de controle tecnológico dos materiais, permitindo uma imersão completa nas decisões de engenharia adotadas. Nesse contexto, a escolha de um caso na região amazônica é particularmente relevante devido aos desafios impostos pelas condições climáticas e geotécnicas locais, que demandam soluções criteriosas. Ademais, para garantir uma análise sistemática, a metodologia foi estruturada em quatro etapas analíticas interdependentes, que progridem desde a caracterização da fundação até as análises de viabilidade e risco. Esta abordagem sequencial está detalhada e visualmente articulada no fluxograma a seguir, que serve como um guia para a lógica investigativa adotada.

Figura 1 – Fluxograma das etapas metodológicas do estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A primeira etapa consistiu na análise da investigação geotécnica e do subsequente dimensionamento estrutural. A caracterização do subleito foi efetuada por meio de três furos de sondagem à percussão SPT, cujos resultados foram correlacionados para estimar o Índice de Suporte Califórnia (CBR). Com base nesses dados, foi definido um valor de CBR de projeto para, então, proceder ao dimensionamento estrutural

fundamentado na metodologia da PCA (1984). Foram analisadas as cargas de projeto, com foco no veículo crítico sidelifter, o período de projeto de 20 anos, e os parâmetros do concreto.

Na segunda fase, foi realizada uma análise técnica e de custos para comparar a solução de pavimento rígido com uma alternativa em pavimento flexível de alto desempenho, dimensionada sobre a mesma fundação de subleito melhorado com solo-cimento. A Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV) utilizou como base o custo inicial por metro quadrado (R\$/m²) de cada solução e projetou os custos de manutenção ao longo de 20 anos, para determinar a alternativa mais viável economicamente no longo prazo.

Para avaliar a variação da espessura do projeto, a terceira etapa compreendeu uma análise de sensibilidade teórica. O objetivo foi quantificar o impacto de variações nos principais parâmetros de entrada sobre a espessura da placa de concreto. Para tal, foram simuladas variações de $\pm 20\%$ no CBR do subleito, na resistência do concreto (f_{ct}, f_{tk}) e no número de repetições de carga. Por fim, a quarta etapa estruturou uma análise dos desafios executivos e dos requisitos de controle de qualidade, baseando-se nas especificações técnicas do projeto e nas melhores práticas da engenharia de pavimentos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e analisados os principais resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia de projeto detalhada anteriormente. A análise primária inicia-se com a caracterização geotécnica da fundação, consolidando os valores do Índice de Suporte Califórnia (CBR) que serviram de base para o dimensionamento. Em seguida, expõe-se o dimensionamento estrutural do pavimento de concreto, realizado segundo o método da Portland Cement Association (PCA), com a definição da espessura da placa e a verificação dos critérios de ruína por fadiga e erosão. Posteriormente, são discutidos os desdobramentos da Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV), que compara a alternativa em concreto com outras tipologias de pavimento, e da análise de sensibilidade, que investiga o impacto das principais variáveis no dimensionamento final, permitindo construir uma avaliação integrada da solução de engenharia.

A contextualização desses resultados é fundamental para a validação da solução de engenharia no âmbito específico de um pátio de contêineres, uma aplicação caracterizada por solicitações de carga singulares. Espera-se que os dados demonstrem a adequação da estrutura para resistir ao tráfego dinâmico de veículos pesados e às elevadas cargas estáticas e concentradas impostas pelas pilhas de contêineres e pelos equipamentos de movimentação, como o sidelifter. Nesse contexto, os resultados contidos nesta seção visam a confirmar que a espessura dimensionada, aliada à resistência do concreto especificada e ao suporte da fundação, compõe um sistema estrutural com as características necessárias para operar com baixa manutenção e elevada vida útil, evidenciando como as premissas de projeto demonstram uma resposta estrutural e econômica compatível com as exigências operacionais.

A análise aprofundada do projeto, complementada pelas investigações geotécnicas, de sensibilidade, de custo e de execução, permitiu uma discussão abrangente sobre a eficácia da solução adotada para o pátio de contêineres. A apresentação dos resultados foi organizada de modo a seguir a sequência lógica da metodologia, iniciando-se pela fundação, passando pelo dimensionamento estrutural e

pelas análises econômicas e de sensibilidade, para, ao final, consolidar os achados de forma integrada.

Os principais resultados contidos nesta seção demonstram, primeiramente, que a adoção de um CBR de projeto conservador foi uma decisão acertada, conferindo maior segurança à estrutura diante das incertezas do subleito. Subsequentemente, o dimensionamento pela metodologia PCA/84 valida uma estrutura resiliente, com consumos de vida útil por fadiga e erosão bem abaixo dos limites admissíveis. A análise econômica, por sua vez, quantifica a vantagem do pavimento rígido em longo prazo, enquanto a análise de sensibilidade identifica os parâmetros de controle mais críticos para o sucesso da execução, direcionando os esforços de fiscalização e controle de qualidade.

4.1 Caracterização geotécnica do subleito

A investigação geotécnica foi fundamental para o projeto. A execução de três furos de sondagem SPT revelou um subsolo com predominância de Areia, Silte e Argila. Os índices de resistência à penetração (SPT) obtidos, que variaram entre 8 e 16 golpes, foram correlacionados para estimar um Índice de Suporte Califórnia (CBR) entre 14,47% e 18,87%. Apesar das estimativas favoráveis, a equipe de projeto adotou, de forma conservadora e segura, um CBR de projeto de 12%. Essa decisão visou mitigar riscos associados à variabilidade do subsolo e à saturação por chuvas, comuns na região, garantindo uma premissa de cálculo mais segura para o dimensionamento do pavimento.

A Tabela 1 a seguir detalha os resultados obtidos nos ensaios de SPT em diferentes profundidades. Nela, observa-se a variação dos índices de resistência à penetração, que serviram como base para a estimativa da capacidade de suporte do terreno. Esses dados foram essenciais para a tomada de decisão sobre a necessidade de uma camada de sub-base robusta e para a definição do CBR de projeto.

Tabela 1 - Resumo dos Parâmetros Geotécnicos do Subleito

Profundidade (m)	Tensão Admissível SP01 (kg/cm²)	Tensão Admissível SP02 (kg/cm²)	Tensão Admissível SP03 (kg/cm²)	SPT SP01	SPT SP02	SPT SP03
1	2,3	1,8	2,5	11	8	12
2	2,5	2,2	2,2	12	10	10
3	2,5	2,0	2,2	12	9	10
4	2,9	2,3	1,8	15	11	8
5	2,0	1,8	2,5	9	8	12
6	2,2	2,3	2,5	10	11	12
7	2,7	2,5	1,8	14	12	8
8	1,6	2,6	1,8	7	13	8
9	1,4	2,5	2,6	6	12	13
10	2,2	2,2	2,5	10	10	12
11	2,3	1,8	2,7	11	8	14
12	3,1	2,2	2,6	17	10	13
13	3,0	2,2	3,0	16	10	16
14	3,2	2,2	2,7	18	10	14
15	3,2	2,5	3,1	18	12	17

Fonte: Adaptado de Oliveira e Bentes (2017)

Complementarmente, a Figura 2 apresenta os resultados dos ensaios laboratoriais realizados com amostras de solo, incluindo a classificação e o valor do CBR obtido para cada ponto de coleta. Destaca-se que os valores de CBR medidos em laboratório, variando de 14,47% a 18,87%, confirmam a boa capacidade de suporte do material local.

A adoção de um valor de projeto inferior (12%) reflete uma prática de engenharia conservadora, que confere maior segurança e confiabilidade ao dimensionamento final.

Figura 2 – Resumo de Ensaios Laboratoriais.

LOCAL DA COLETA	CERTEZA	CLASSIFICAÇÃO TÍPICA	CERTEZA	PENETRAMENTO / % penetrado				ÍNDICE DIRETO		CLASSIFICAÇÃO			ÍNDICE UNIFORME (%)	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO PROPOSTA		CBR					
				4	22	40	200	10	18	ÍNDICE DE GRUPO	1-3	4-5		MOD (%)	MOD (%)	10-100	10-100	10-100	10-100	10-100	10-100
				4.8 mm	2.0 mm	0.43 mm	0.075 mm														
PONTO 1	1	Areia Anglica	Variante 1	94	92	10.45	13.87	N.P.	N.P.	0	A-3	SP	21.40	0.33	1.878	11.47	8.88				83.38
PONTO 2	2	Areia Anglica	Variante 1	87	85	10.82	10.40	N.P.	N.P.	0	A-3-4	SC	29.31	0.40	2.003	11.37	6.88				83.75
PONTO 3	3	Areia Anglica	Variante 1	88	88	10.81	10.36	N.P.	N.P.	0	A-3-4	SC	25.31	0.40	2.018	11.40	6.81				75.48

Fonte: Adaptado de Oliveira e Bentes (2017)

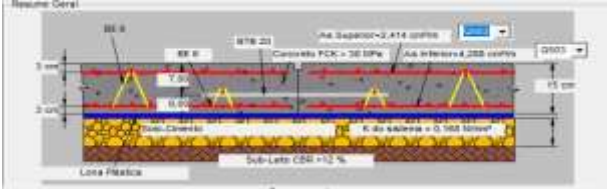
A condução da investigação geotécnica, por meio da integração entre ensaios de campo (SPT) e laboratoriais (CBR e caracterização), cumpriu com o seu objetivo de fornecer parâmetros de suporte confiáveis para o dimensionamento. A estratégia de correlacionar os dados do SPT com o CBR permitiu uma avaliação preliminar abrangente, posteriormente validada pelos ensaios diretos. A decisão de adotar um valor de CBR de projeto inferior aos medidos atendeu às expectativas de segurança de projeto, portanto é uma medida coerente com as incertezas inerentes ao comportamento de solos tropicais sob regime de chuvas intensas. Dessa forma, a caracterização geotécnica foi bem-sucedida, estabelecendo uma base sólida e segura para o dimensionamento estrutural subsequente.

4.2 Dimensionamento e detalhamento da estrutura

Com base na fundação caracterizada, o dimensionamento resultou em uma estrutura multicamadas composta por uma placa de concreto armado de 15 cm, sobre uma sub-base de solo-cimento também de 15 cm. A análise de fadiga e erosão indicou um consumo de vida útil de 75,3% e 4,6%, respectivamente, validando a estrutura para a vida útil de 20 anos com um fator de segurança de cargas de 1,4. O projeto detalha um sistema de juntas com barras de transferência e de ligação, cruciais para o desempenho mecânico, e uma modulação de placas que aperfeiçoa o uso de telas de aço comerciais.

A Figura 3 ilustra a seção transversal típica do pavimento projetado. Este esquema visual é fundamental para a compreensão da interação entre as camadas, mostrando a placa de concreto duplamente armado, a lona plástica de separação, a sub-base estabilizada de solo-cimento e o subleito com CBR controlado. A figura detalha ainda os cobrimentos da armadura e o coeficiente de reação do sistema (k), sintetizando visualmente as principais premissas e resultados do dimensionamento estrutural.

Figura 3 – Seção transversal típica do pavimento rígido projetado.



Fonte: Paiva (2024)

A Tabela 2 centraliza os parâmetros de entrada e os resultados finais do cálculo estrutural. Este quadro detalha as principais variáveis de projeto, distinguindo entre os dados de entrada, como o período de projeto, a resistência característica do concreto à tração na flexão ($f_{ct,f,k}$) e a capacidade de suporte da fundação (CBR), e os resultados de saída, notadamente a espessura final da placa de concreto e da camada de sub-base. A organização dos dados confere clareza e transparência ao processo de dimensionamento, permitindo uma rápida verificação das premissas adotadas e serve como um registro técnico das especificações da estrutura. Através da análise conjunta desses valores, evidencia-se a interdependência entre as propriedades dos materiais, a capacidade da fundação e a geometria da laje para atender aos critérios de desempenho, refletindo uma concepção de engenharia que prioriza a durabilidade e a segurança estrutural. Dessa maneira, a tabela atua como um elo fundamental entre a metodologia de cálculo previamente descrita e a subsequente análise dos resultados, fornecendo uma base quantitativa essencial para a compreensão do desempenho esperado da estrutura.

Tabela 2 – Resumo do dimensionamento

Parâmetros de projeto	Valor
Espessura do pavimento	15 cm
k sistema	168 MPa/m
Resistência característica à tração na flexão, $f_{ctM,k}$	4,5 MPa
Espessura da sub-base	15 cm
CBR	> 12%
Juntas com BT	Sim
Acostamento de concreto	Não
Período de projeto	20 anos
Fator de segurança de cargas, F_{sc}	1,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de dimensionamento estrutural, executado com base na metodologia da PCA, foi conduzido com o objetivo de definir uma seção de pavimento capaz de resistir às cargas solicitantes ao longo da vida útil estipulada. As expectativas eram de que os critérios de fadiga do concreto e de erosão da fundação fossem atendidos com uma margem de segurança adequada, o que foi confirmado pelos baixos percentuais de consumo de vida útil. A solução final, composta pela placa de concreto e sub-base de solo-cimento, demonstrou ser coerente com as premissas geotécnicas e de carregamento, resultando em um projeto que atendeu plenamente aos requisitos de desempenho e durabilidade.

4.3 Análise comparativa das soluções de pavimento e viabilidade econômica

A análise comparativa entre as soluções de pavimento rígido e flexível é crucial para contextualizar a decisão de projeto. A solução em pavimento rígido adotada apresenta vantagens intrínsecas para as solicitações do pátio, notadamente pela sua elevada rigidez que distribui as cargas concentradas do *sidelifter* e pela sua superior resistência à deformação permanente sob as cargas estáticas dos contêineres. Em contrapartida, uma solução flexível, mesmo robusta, seria inerentemente suscetível a afundamentos e à fadiga acelerada, demandando um ciclo de manutenções mais frequente e oneroso.

As composições de custos unitários, utilizadas tanto para a etapa de construção quanto para as intervenções de manutenção de ambas as alternativas de pavimento, foram extraídas do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO),

mantido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Em paralelo, o plano de manutenção, que define a periodicidade e o escopo dos serviços de conservação ao longo dos 20 anos de análise, foi pressuposto com base na experiência e na observação do desempenho de obras de pavimentação análogas, sujeitas a solicitações de tráfego e condições ambientais semelhantes. A adoção do SICRO como fonte de custos garante a padronização e a replicabilidade da análise financeira, alinhando-a a um referencial amplamente reconhecido no âmbito nacional, enquanto a definição do cronograma de manutenção a partir de um critério empírico se baseia na projeção em um cenário pragmático e consistente com a prática da engenharia. Portanto, essa combinação de uma base de custos padronizada com uma projeção de intervenções fundamentada na experiência prática assegura que as conclusões sobre a viabilidade econômica de longo prazo sejam robustas e aplicáveis à tomada de decisão em projetos de infraestrutura.

Essa premissa técnica é quantificada pela Análise de Custo de Ciclo de Vida. Para a solução rígida, verificou-se para a área pavimentada um custo inicial de R\$ 469,15/m². Para a alternativa flexível de alto desempenho, estimou-se um custo inicial inferior, de R\$ 245,00/m². No entanto, a projeção de custos ao longo de 20 anos demonstrou que a alta demanda por manutenções estruturais na solução flexível inverte o cenário. O Gráfico 1 ilustra essa inversão, mostrando que o custo acumulado da alternativa flexível ultrapassa o da rígida no 10º ano, tornando-a significativamente mais cara ao final da vida útil.

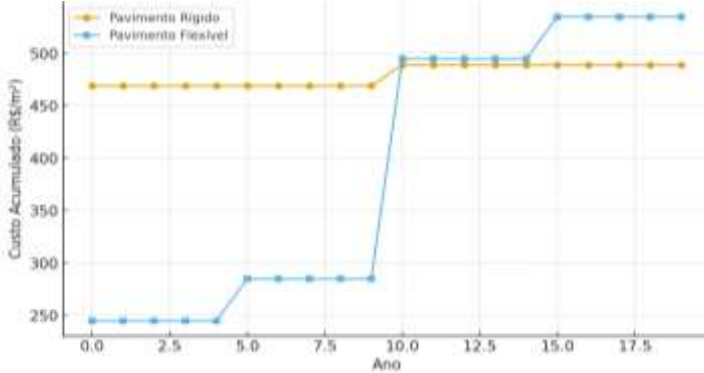
Tabela 3 - Análise Comparativa de Custo Acumulado vs. Tempo

Ano	Custo Anual (R\$/m²) - Pav. Rígido	Custo Acumulado (R\$/m²) - Pav. Rígido	Custo Anual (R\$/m²) - Pav. Flexível	Custo Acumulado (R\$/m²) - Pav. Flexível
0	469,15	469,15	245,00	245,00
1	0,00	469,15	0,00	245,00
2	0,00	469,15	0,00	245,00
3	0,00	469,15	0,00	245,00
4	0,00	469,15	0,00	245,00
5	0,00	469,15	40,00	285,00
6	0,00	469,15	0,00	285,00
7	0,00	469,15	0,00	285,00
8	0,00	469,15	0,00	285,00
9	0,00	469,15	0,00	285,00
10	20,00	489,15	210,00	495,00
11	0,00	489,15	0,00	495,00
12	0,00	489,15	0,00	495,00
13	0,00	489,15	0,00	495,00
14	0,00	489,15	0,00	495,00
15	0,00	489,15	40,00	535,00
16	0,00	489,15	0,00	535,00
17	0,00	489,15	0,00	535,00
18	0,00	489,15	0,00	535,00
19	0,00	489,15	0,00	535,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 1 a seguir apresenta a evolução dos custos acumulados para ambas as soluções ao longo da vida útil de 20 anos. As curvas ilustram o impacto dos custos de construção e manutenção ao longo do tempo. Fica evidente que, embora a alternativa flexível possua um menor custo inicial, as intervenções de manutenção periódicas e de alto custo fazem com que seu valor acumulado supere o da solução em pavimento rígido, validando a escolha do projeto como a mais econômica no longo prazo.

Gráfico 1 - Análise Comparativa de Custo Acumulado vs. Tempo (ACCV)



Fonte: Elaborado pelo autor.

No que se refere às intervenções de manutenção estimadas, o pavimento rígido apresentou apenas serviços pontuais de caráter preventivo. Após o custo inicial de R\$ 469,15/m², manteve-se estável até o décimo ano, quando foi prevista a execução de selagem de juntas, no valor de R\$ 20,00/m², totalizando R\$ 489,15/m² ao final de 20 anos. Em contrapartida, o pavimento flexível demonstrou maior demanda de serviços ao longo do período. No quinto ano, foram considerados reparos localizados em defeitos superficiais, com custo de R\$ 40,00/m². No décimo ano, a deterioração mais significativa da camada de rolamento necessita de realização de fresagem do revestimento e aplicação de novo recapeamento asfáltico, representando custo de R\$ 210,00/m². Por fim, no décimo quinto ano, previu-se a execução de recapeamento superficial com aplicação de camada de desgaste, no valor de R\$ 40,00/m². Dessa forma, o pavimento flexível acumulou um custo total de R\$ 535,00/m² ao final do horizonte de 20 anos. Assim, constata-se que, embora apresente menor custo inicial, o pavimento flexível requer serviços corretivos e estruturais mais recorrentes, enquanto o pavimento rígido demanda apenas manutenções preventivas simples, evidenciando melhor desempenho em termos de durabilidade e custo global ao longo do ciclo de vida.

4.4 Análise de sensibilidade do dimensionamento

Verificou-se uma alta sensibilidade da espessura a variações no Índice de Suporte Califórnia (CBR) do subleito e na resistência à tração na flexão do concreto (fct,f,k). Isso ocorre porque o CBR influencia diretamente o módulo de reação da fundação, que determina a qualidade do suporte oferecido às placas, um suporte inferior exige uma laje mais espessa para distribuir as cargas e mitigar as tensões atuantes. De forma análoga, a resistência do concreto é um parâmetro fundamental no modelo de fadiga, pois define a capacidade da estrutura de suportar as repetições de carga ao longo da vida útil. Em contrapartida, o dimensionamento mostrou-se menos sensível a um aumento no volume de tráfego, o que se justifica pela natureza não linear da relação entre o consumo de fadiga e a espessura, onde acréscimos significativos no número de eixos equivalentes resultam em incrementos modestos na espessura requerida. Esta constatação possui implicações práticas relevantes, pois demonstra que, embora o projeto apresente segurança em relação às incertezas inerentes à projeção de tráfego, sua segurança e desempenho em longo prazo são criticamente dependentes da

qualidade da execução da terraplenagem e do controle tecnológico do concreto. Dessa forma, os resultados reforçam a tese de que é necessário um rigoroso controle de execução, garantindo que as premissas de projeto para a fundação e para o concreto sejam efetivamente alcançadas em campo, é mais determinante para a longevidade do pavimento do que o superdimensionamento para cenários de tráfego conservadores.

A Tabela 4 apresenta os resultados quantitativos da análise de sensibilidade, detalhando como a espessura da placa de concreto varia em função de alterações de $\pm 20\%$ nos principais parâmetros de entrada do dimensionamento, mantendo os demais parâmetros constantes. Os dados permitem uma visualização clara do impacto de cada variável, servindo como um guia para a identificação dos fatores mais críticos que devem ser monitorados durante a execução da obra.

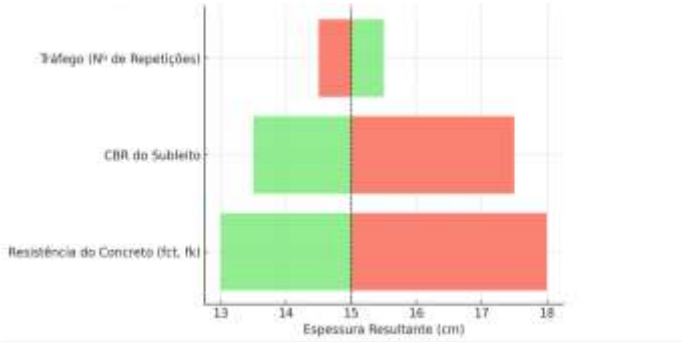
Tabela 4 - Análise de sensibilidade da espessura do pavimento

Parâmetro Analisado	Variação	Espessura Resultante (cm)
Resistência do Concreto (fct,fk)	-20%	18,0
Resistência do Concreto (fct,fk)	+20%	13,0
CBR do Subleito	-20%	17,5
CBR do Subleito	+20%	13,5
Tráfego (Nº de Repetições)	-20%	14,5
Tráfego (Nº de Repetições)	+20%	15,5
Referência de Projeto	0%	15,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 2 abaixo demonstra o impacto de variações de $\pm 20\%$ nos principais parâmetros de entrada sobre a espessura final da placa. A análise visual do gráfico permite identificar rapidamente que a resistência do concreto e o CBR do subleito são as variáveis de maior influência. Este resultado prático orienta a fiscalização da obra a focar seus esforços de controle de qualidade nesses dois itens, que são os mais críticos para garantir o desempenho e a segurança da estrutura projetada.

Gráfico 2 - Análise de sensibilidade da espessura do pavimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4 apresenta um registro fotográfico da área de pavimento executada. Na imagem, é possível observar a conformação final da estrutura, destacando-se a regularidade geométrica das placas de concreto e o alinhamento preciso das juntas construtivas e de retração. O detalhe das juntas devidamente seladas evidencia a atenção a um ponto crítico para a durabilidade do pavimento, essencial para impedir a

infiltração de água e materiais incompressíveis, mitigando o risco de patologias como o esborcinamento (spalling).

Figura 6 – Pavimento executado



Fonte: Acervo pessoal do autor.

Adicionalmente, o acabamento superficial uniforme da laje de concreto é visível, indicando a correta aplicação das técnicas de cura e acabamento, fatores determinantes para a resistência ao desgaste e para a segurança operacional. Dessa forma, a imagem sintetiza a realização dos objetivos do projeto, apresentando a estrutura finalizada e em conformidade com as premissas de qualidade, pronta para suportar as solicitações da operação logística a que se destina.

5. CONCLUSÃO

Em síntese, o presente estudo de caso demonstrou de forma conclusiva a adequação técnica e a viabilidade econômica da solução de pavimento rígido para o pátio de contêineres do Centro de Operações Logísticas. A metodologia de projeto, com base em uma criteriosa investigação geotécnica e na aplicação do consagrado método PCA/84, resultou em uma estrutura de 15 cm de concreto armado sobre 15 cm de sub-base de solo-cimento, plenamente capaz de suportar as severas cargas dinâmicas e estáticas previstas para uma vida útil de 20 anos, conforme comprovado pelas análises de fadiga e erosão.

Ademais, a análise de sensibilidade realizada neste trabalho demonstrou que os fatores mais críticos para o sucesso do empreendimento. Ficou evidente que, embora o dimensionamento seja seguro em relação às projeções de tráfego, o desempenho real da estrutura está intrinsecamente ligado à garantia da capacidade de suporte da fundação (CBR) e à obtenção da resistência do concreto especificada em projeto. Este resultado reforça a tese de que um projeto de engenharia de alta performance só se materializa por meio de um controle tecnológico rigoroso em todas as fases da obra, desde a terraplenagem até a cura do concreto.

A Análise de Custo de Ciclo de Vida (ACCV) foi essencial ao validar a decisão estratégica. Apesar do investimento inicial associado ao pavimento rígido ser superior ao de uma alternativa flexível, a projeção de custos ao longo de duas décadas demonstrou que a drástica redução com despesas de manutenção e reabilitação torna o pavimento de concreto a opção mais econômica e sustentável. Essa análise demonstra que a visão de que o menor custo inicial é sempre a melhor escolha, provando que, para

infraestruturas críticas, a perspectiva do custo global ao longo do tempo é o indicador de decisão mais racional.

Por fim, este artigo contribui com a validação de um projeto específico e apresenta um modelo de análise, que integra as dimensões técnica, geotécnica, econômica e executiva. Para a Região Amazônica, onde as condições ambientais e logísticas são desafiadoras, este estudo de caso serve como um valioso referencial para futuros projetos de infraestrutura, demonstrando um caminho para a construção de obras mais duráveis, resilientes e de menor custo de manutenção, alinhadas com as necessidades estratégicas de desenvolvimento regional.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.
- BALBO, J. T. *Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BALIEIRO, L. D. O. *Soluções para pisos industriais em concreto armado*. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) – Universidade de Minas Gerais, Minas Gerais, 2015.
- BASTOS, G. E. R.; PINHEIRO, E. C. N. M. Critérios para seleção de técnicas no tratamento de piso de concreto polido: um estudo de caso em edificação comercial atacadista na cidade de Manaus - AM. *Revista Foco*, v. 17, n. 10, p. 01-18, 2024.
- BATTABIN, A. F.; BATTABIN, I. L. S. A Norma Brasileira de água de amassamento do concreto - uma contribuição para a sustentabilidade. *Revista Concreto & Construções*, n. 58, p. 37-45, 2010.
- BENTO, A. H.; FROTA, C. A. Mapeamento geotécnico da área urbana de Manaus, AM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA, 3., 1998, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis, 1998.
- COMISSÃO REGIONAL DE OBRAS DA 12ª REGIÃO MILITAR. *Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental: Pavimentação do Pátio de Contêineres*. Manaus: Exército Brasileiro, 2024.
- GIUBLIN, C. R. et al. Corredor de ônibus em pavimento de concreto na Linha Verde de Curitiba. *Revista Concreto & Construções*, n. 58, p. 15-23, 2010.
- LIMA, I. G. S.; SOUZA, W. L. *Implantação de um pavimento rígido na rotatória da SUFRAMA em Manaus/AM*. 2018.
- MAGALHÃES, V. C. O.; PINHEIRO, E. C. N. M.; MIRANDA, W. P. O pavimento rígido como solução construtivo de uma obra de pavimentação no distrito industrial da cidade de Manaus: estudo de caso. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 12, p. 118169-118179, 2021.
- MEDINA, J., & MOTTA, L. M. G. *Mecânica dos pavimentos* (3a ed.). Interciência, 2015.
- MESQUITA, J. C. *Pavimento rígido como alternativa econômica para pavimentação rodoviária Estudo de caso: Rodovia BR-262, Miranda Morro do Azeite-MS*. 2001. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Concrete Technology*. 2. ed. Harlow: Pearson Education, 2010.
- OLIVEIRA E BENTES CONSULTORIA E SERVIÇOS DE ARQUITETURA LTDA. *Relatório de Sondagem*. 2017.
- PAIVA, GABRIEL PESSOA. *Memorial descritivo e especificação técnica (Terraplenagem, Pavimentação e Drenagem)*. Manaus: Exército Brasileiro, 2024.
- PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. Oficina de Textos, 2006.
- SARGES, R. R. et al. Depósitos argilosos cenozóicos do estado do Amazonas: utilização como agregados de argilas calcinadas para pavimentações na região Amazônica. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, 2010.
- SILVA, M. G.; GOMES, V.; TANESI, J. Uma análise crítica sobre a vida útil e a durabilidade na NBR 6118/2003. *Revista Concreto & Construções*, n. 58, p. 96-101, 2010.

SOUTHGATE, H. F.; DEEN, R. C. *Thickness Design Procedure for Portland Cement Concrete Pavements*. Research Report UKTRP-84-6. Kentucky Transportation Research Program, University of Kentucky, 1984.

WALLS III, J.; SMITH, M. R. *Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design*. Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-SA-98-079, 1998. diss., Universidade Federal de Pernambuco.