

OTIMIZAÇÃO LOGÍSTICA DO TRANSPORTE E APLICAÇÃO DE MASSA ASFÁLTICA QUENTE (CBUQ)

BARROS, JAQUELINE GONÇALVES ¹. VITOY, RICARDO ¹. FREITAS, MARCUS VINICIUS MARTINS ¹. ROCHA, SANTIAGO MEIRELES ¹.

Escola Politécnica e de Artes
Pontifícia Universidade Católica de Goiás ¹
Goiânia - GO - Brasil

RESUMO: O transporte do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) influencia diretamente a qualidade da pavimentação devido às perdas térmicas durante o deslocamento. Este trabalho teve como objetivo analisar a logística de transporte e aplicação do CBUQ, propondo melhorias para reduzir perdas de temperatura e aumentar a eficiência operacional. A metodologia consistiu em um estudo de caso em uma usina de pavimentação, com análise de rotas, tempos de transporte, fluxo logístico e monitoramento térmico. Os resultados indicaram que a utilização de lã de rocha associada à manta aluminizada pode reduzir as perdas térmicas entre 40% e 60%, preservando a temperatura adequada para aplicação da mistura asfáltica. A solução também contribui para a redução de desperdícios, retrabalhos e custos operacionais. Conclui-se que a otimização logística e o isolamento térmico das caçambas são alternativas viáveis para aumentar a produtividade, a qualidade e a durabilidade dos pavimentos asfálticos.

Palavras-chave: Perdas Térmicas; Isolamento Térmico; Eficiência Operacional; Pavimentação; Manta Aluminizada.

ABSTRACT: The transportation of Hot Mix Asphalt Concrete (HMAC) directly influences pavement quality due to thermal losses that occur during transit. This study aimed to analyze the transportation and application logistics of HMAC, proposing improvements to reduce temperature losses and increase operational efficiency. The methodology consisted of a case study conducted at an asphalt production plant, including the analysis of routes, transportation times, logistics flow, and thermal monitoring. The results indicated that the use of rock wool combined with an aluminized thermal blanket can reduce thermal losses by 40% to 60%, preserving the appropriate temperature for the application of the asphalt mixture. This solution also contributes to reducing material waste, rework, and operational costs. It is concluded that logistics optimization and the thermal insulation of truck beds are viable alternatives for increasing the productivity, quality, and durability of asphalt pavements.

Keywords: Thermal losses; Thermal Insulation; Operational Efficiency; Pavement Construction; Aluminum-coated blanket.

1. Introdução

A pavimentação asfáltica desempenha papel fundamental no desenvolvimento da infraestrutura de transportes, sendo responsável por garantir melhores condições de mobilidade, segurança e eficiência no deslocamento de pessoas e mercadorias. Entre os

materiais mais utilizados nesse processo destaca-se o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), amplamente empregado em obras de pavimentação devido às suas características de resistência, durabilidade e desempenho estrutural [3]. Entretanto, a aplicação desse material envolve desafios operacionais significativos, especialmente relacionados à logística de transporte entre a usina de produção e o local de aplicação.

O CBUQ é produzido em temperaturas elevadas e precisa ser transportado e aplicado dentro de uma faixa térmica adequada para manter suas propriedades físicas e garantir a qualidade da pavimentação [3]. Durante o transporte, fatores como distância entre a usina e a obra, condições das vias, tempo de deslocamento, capacidade da frota e sincronização entre produção e aplicação podem influenciar diretamente na perda de temperatura do material. Essas perdas térmicas podem comprometer a trabalhabilidade da mistura asfáltica, gerar desperdícios, reduzir a qualidade do revestimento e aumentar custos operacionais [5].

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar a logística de transporte e aplicação de massa asfáltica quente em uma usina de pavimentação, buscando identificar oportunidades de otimização que contribuam para a redução de perdas térmicas e para o aumento da eficiência operacional do processo. Para isso, será realizado um estudo de caso envolvendo a análise do fluxo logístico entre a usina e o local de aplicação, considerando fatores como tempo de transporte, definição de rotas, sincronização das operações e controle das condições do material durante o deslocamento.

2. Referencial teórico

2.1 Logística e Gestão da Cadeia de Suprimentos

A logística é um dos principais pilares da Engenharia de Produção, sendo responsável pelo planejamento, execução e controle do fluxo de materiais, informações e recursos desde a origem até o consumidor final. Segundo Ballou [1], a logística empresarial tem como objetivo disponibilizar o produto certo, no local correto, no tempo adequado e ao menor custo possível, garantindo eficiência operacional e satisfação do cliente.

No contexto da cadeia de suprimentos, a logística assume papel estratégico ao integrar diferentes etapas do processo produtivo, promovendo a coordenação entre fornecedores, produção e distribuição. De acordo com Chopra e Meindl [2], a gestão eficiente da cadeia de suprimentos contribui para a redução de custos, melhoria do nível de serviço e aumento da competitividade das organizações.

Além disso, a crescente complexidade dos sistemas produtivos exige o uso de ferramentas e métodos que permitam otimizar processos logísticos. Técnicas como análise de rotas, planejamento de transporte e sincronização de operações são fundamentais para minimizar desperdícios e aumentar a eficiência. Nesse sentido, a aplicação de conceitos logísticos torna-se essencial em setores que demandam alta precisão operacional, como é o caso da pavimentação asfáltica.

2.2 Logística no Transporte de Materiais Asfálticos (CBUQ)

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é um dos principais materiais utilizados na pavimentação asfáltica, sendo produzido em usinas específicas e transportado até o local de aplicação. Por se tratar de um material que depende de condições térmicas controladas, o processo logístico de transporte é considerado crítico para a qualidade final da obra.

De acordo com Bernucci et al. [3], o CBUQ deve ser transportado a uma temperatura entre 155°C e 177°C, e aplicado dentro de uma faixa de temperatura adequada, geralmente entre 133°C e 148°C, para garantir sua trabalhabilidade e desempenho mecânico.

De acordo com as especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o controle da temperatura do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é fundamental para garantir a qualidade da compactação e o desempenho estrutural do revestimento asfáltico.

Segundo a norma DNIT 031/2006-ES, a mistura asfáltica deve ser aplicada dentro de faixas específicas de temperatura, de forma a preservar suas propriedades mecânicas e garantir adequada compactação do material.

Além disso, o DNIT destaca que perdas térmicas excessivas durante o transporte podem comprometer significativamente a qualidade final do pavimento e reduzir sua vida útil.

A logística de transporte nesse contexto envolve o planejamento eficiente das rotas, a definição adequada da frota e a sincronização entre a produção na usina e a aplicação na obra. Segundo CNT [4], falhas no planejamento logístico podem resultar em aumento de custos operacionais, atrasos e perda de qualidade do material.

Dessa forma, a gestão logística aplicada ao transporte de CBUQ deve buscar minimizar o tempo entre produção e aplicação, garantindo que o material chegue ao destino dentro das condições ideais de uso.

2.3 Perdas Térmicas e Qualidade do CBUQ

A perda de calor durante o transporte do CBUQ está diretamente relacionada aos mecanismos de transferência de calor, que ocorrem por condução, convecção e radiação. De acordo com Incropera, et al. [7], a condução refere-se à transferência de calor através de um meio sólido, como ocorre na interação entre a mistura asfáltica e a estrutura metálica da caçamba do caminhão. Assim como a convecção natural e forçada que ocorre na parte superior da caçamba. Perdas por radiação ocorre em ambas as partes.

Para analisar a relação entre massa, calor específico e variação de temperatura dos materiais, contribuindo para a compreensão do comportamento térmico da mistura e quantificar a energia térmica necessária para elevar a temperatura da mistura asfáltica durante o processo de usinagem é usada a Equação do Calor Sensível (1).

$$q = mc(T_2 - T_1) \quad (1)$$

Onde:

- Q = quantidade de calor (J ou cal)
- m = massa da substância (kg ou g)
- c = calor específico da substância (J/ kg • °C ou cal/g • °C)
- T_1 = temperatura inicial (Temperatura da Mistura ao sair da usina)
- T_2 = temperatura final (Temperatura de Compactação)
- $(T_2 - T_1)$ = variação de temperatura (ΔT)

No contexto do transporte de misturas asfálticas, esses três mecanismos atuam simultaneamente, promovendo a redução da temperatura do material ao longo do trajeto.

Fatores como tempo de transporte, condições climáticas, isolamento térmico dos caminhões e volume de carga transportada influenciam diretamente na intensidade dessas trocas térmicas.

Segundo Specht et al. [5], a redução da temperatura da mistura asfáltica compromete sua compactação e aderência, podendo resultar em defeitos no pavimento, como trincas, desagregação e redução da vida útil da via. Além disso, temperaturas inadequadas dificultam a aplicação do material, aumentando o esforço operacional e o consumo de recursos.

Estudos indicam que perdas térmicas superiores a 10 °C já podem comprometer parcialmente a trabalhabilidade da mistura, enquanto reduções acima de 20 °C tornam-se significativamente prejudiciais à compactação e ao desempenho do revestimento asfáltico, principalmente em trajetos longos ou sob condições climáticas adversas [5]. Nessas situações, o CBUQ pode chegar à obra fora da faixa ideal de aplicação, reduzindo a eficiência da compactação e aumentando a probabilidade de falhas prematuras no pavimento.

A Tabela 1 apresenta valores aproximados de condutividade térmica de materiais utilizados em estruturas metálicas e sistemas de isolamento térmico, conforme dados apresentados por Incropera et al. [7].

Tabela 1 – Condutividade térmica de materiais utilizados em isolamento térmico

Material	Condutividade térmica k (W/m ×K)
Aço carbono SAE 1020	51,9
Lã de vidro	0,038 a 0,045
Lã de rocha	0,035 a 0,045
Manta térmica aluminizada	0,030 a 0,040

Observa-se que materiais isolantes apresentam coeficientes de condutividade térmica significativamente inferiores ao aço carbono, reduzindo a transferência de calor entre o CBUQ e o ambiente externo. Dessa forma, o uso de revestimentos térmicos em caçambas e lonas contribui para a manutenção da temperatura da mistura durante o transporte.

Outro impacto relevante das perdas térmicas está relacionado ao aumento de desperdícios e custos operacionais. Quando o material chega fora da faixa ideal de aplicação, muitas vezes torna-se necessário o descarte parcial da mistura ou a realização de retrabalhos, aumentando os custos com combustível, produção e mão de obra. Segundo estudos da área de pavimentação asfáltica, perdas térmicas também podem elevar o consumo energético das usinas e aumentar a emissão de gases poluentes associados à produção e reaplicação do material [5].

Além dos prejuízos financeiros, existem impactos ambientais relevantes decorrentes do descarte inadequado de misturas asfálticas e do aumento no consumo de combustíveis fósseis durante operações corretivas. De acordo com pesquisas sobre sustentabilidade em pavimentação, a redução da eficiência térmica no transporte contribui para maiores emissões de dióxido de carbono (CO₂) e desperdício de recursos minerais utilizados na composição do CBUQ [5].

Nesse contexto, torna-se fundamental o monitoramento da temperatura ao longo de toda a cadeia logística, bem como a adoção de práticas que reduzam as perdas térmicas,

como o uso de lonas térmicas, isolamento de caçambas e otimização do tempo de transporte.

2.4 Modelagem simplificada das Perdas Térmicas no Transporte do CBUQ

O processo de perda térmica do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) durante o transporte pode ser analisado com base nos princípios da transferência de calor, especialmente pelos mecanismos de condução, convecção e radiação térmica.

No presente estudo, foi utilizada uma modelagem simplificada baseada em Incropera et al. [7], na Lei de Fourier, Lei de Newton para transporte de calor por convecção, radiação e quantidade de calor. Foi adotado o calor específico do CBUQ de 900 KJ/KgK, O calor específico médio das rochas varia de 800 a 1.000 KJ/(kg.K) à temperatura ambiente, e o do ligante asfáltico (CAP) puro passa de 1.700 KJ/(kg.K).

2.5 Otimização de Processos Logísticos

A otimização de processos logísticos consiste na aplicação de técnicas e ferramentas que visam melhorar a eficiência das operações, reduzindo custos e aumentando a produtividade. No âmbito da Engenharia de Produção, essa otimização pode ser realizada por meio da análise de processos, identificação de gargalos e implementação de melhorias contínuas.

Segundo Slack et al. [6], a gestão eficiente das operações depende da capacidade de planejar e controlar recursos de forma integrada, garantindo o melhor desempenho possível do sistema produtivo. No caso da logística de transporte de CBUQ, isso envolve a coordenação entre usina, transporte e equipe de aplicação.

Ferramentas como mapeamento de processos, análise de tempos e movimentos, roteirização de transporte e indicadores de desempenho são amplamente utilizadas para identificar ineficiências e propor melhorias. A aplicação dessas ferramentas permite reduzir tempos de espera, evitar ociosidade e melhorar o fluxo de materiais.

Dessa forma, a otimização logística se apresenta como um elemento essencial para garantir a qualidade e a competitividade no setor de pavimentação asfáltica.

3. Metodologia

A metodologia adotada neste estudo tem como objetivo analisar e propor melhorias na logística de transporte e aplicação de massa asfáltica quente (CBUQ), com foco na redução de perdas térmicas e aumento da eficiência operacional do processo.

A lógica técnica da proposta baseia-se no princípio da transferência de calor, em que quanto menor a condutividade térmica do material isolante, menor será a perda de calor através das paredes metálicas da caçamba. De forma específica, de acordo com Incropera et al. [7], foi analisado a resistência térmica (RT) das paredes da caçamba convencional e com isolamento térmico, assim como o uso da manta de cobertura e sem ela.

3.1 Caracterização do local de estudo

O estudo de caso foi realizado na empresa T OLIVER ASFALTOS LTDA localizada na cidade de Aparecida de Goiânia - GO. A empresa atua na produção e aplicação de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), atendendo obras de infraestrutura urbana e rodoviária na região.

O processo produtivo da usina envolve etapas de produção da mistura asfáltica, carregamento do material em caminhões, transporte até o local da obra e aplicação por meio de equipamentos específicos.

A coleta de dados foi realizada por meio de um estudo de caso na usina de pavimentação, envolvendo as seguintes etapas:

- 1- Observação direta das operações de carregamento, transporte e aplicação do CBUQ;
- 2- Levantamento dos tempos de deslocamento entre usina e obra;
- 3- Registro das rotas utilizadas pelos caminhões;
- 4- Medição da temperatura da massa asfáltica em diferentes pontos do processo (saída da usina e chegada na obra);
- 5- Entrevistas com operadores e responsáveis pela logística;
- 6- Levantamento das condições estruturais das caçambas utilizadas no transporte;
- 7- Estudo comparativo entre materiais isolantes térmicos aplicáveis ao sistema de transporte.

Essas informações permitiram mapear o fluxo logístico e identificar possíveis gargalos no processo.

Além disso, foram analisados materiais isolantes com potencial de aplicação industrial, considerando critérios como:

- condutividade térmica;
- resistência térmica;
- custo de implementação;

3.4 Análise de dados

Os dados coletados foram analisados por meio de:

- Mapeamento do fluxo logístico;
- Comparação entre tempos previstos e reais de transporte;
- Avaliação da variação de temperatura ao longo do trajeto;
- Identificação de falhas na sincronização entre produção e aplicação;
- Identificação das atuais condições e estruturas construtivas;
- Equacionar as perdas de calor no sistema de transporte;
- Analisar materiais e estruturas buscando redução de perdas de calor;
- Quantificar as melhorias propostas.

4. Resultados e Discussões

4.1 Análise do processo logístico

O processo logístico analisado compreende as etapas de produção do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), carregamento nos caminhões, transporte até o local da obra e aplicação do material. Durante a análise, foi possível observar que a sincronização entre essas etapas é fundamental para garantir a eficiência operacional e a qualidade do material.

Verificou-se que o tempo de transporte e as condições das rotas exercem influência direta na temperatura do CBUQ no momento da aplicação. Em situações de maior distância entre a usina e o local da obra, observou-se maior perda térmica, o que pode comprometer a trabalhabilidade do material.

Observou-se ainda que a ausência de sistemas eficientes de conservação térmica nas caçambas contribui significativamente para a aceleração das perdas de calor durante o transporte, principalmente em trajetos longos e sob condições climáticas desfavoráveis.

4.2 Identificação de gargalos

A partir do mapeamento do processo, foram identificados alguns gargalos operacionais que impactam a eficiência logística. Entre os principais, destacam-se:

- Tempo de espera dos caminhões para carregamento
- Falta de sincronização entre produção e aplicação
- Rotas com condições inadequadas
- Ausência de controle rigoroso da temperatura durante o transporte

Esses fatores contribuem para o aumento do tempo de ciclo e para a ocorrência de perdas térmicas no material transportado.

Além dos gargalos operacionais identificados, verificou-se que a inexistência de isolamento térmico adequado nas carretas potencializa as perdas energéticas do sistema, reduzindo a eficiência logística e aumentando a probabilidade de falhas construtivas relacionadas à temperatura inadequada do CBUQ no momento da aplicação.

4.3.1 Avaliação da implementação do isolamento térmico

Para essa análise considerou uma carreta de transporte rodoviário com capacidade de transporte de 20 toneladas de CBUQ ($c_p = 900 \text{ KJ} / \text{Kg K}$) medidas de comprimento x largura e altura de 5m x 2,50m x 1,5m. Considerou espessura de chapa de aço carbono

com 8mm de espessura e condutividade térmica de 51,9 W/m K. A variação de temperatura do CBUQ foi de 177 °C a 148 °C equivalente a 29 °C.

A partir da análise comparativa entre os cenários com e sem isolamento térmico nas caçambas de transporte, verificou-se redução significativa nas perdas de temperatura do CBUQ ao longo do trajeto.

De acordo com a Tabela 2, observa-se que a resistência térmica (RT) é significativamente inferior à condição com isolamento térmico. Tal análise inviabiliza o uso de carretas com caçambas convencionais para transporte de CBUQ, especialmente em rotas superiores a 100 km ou em condições climáticas desfavoráveis. Em situações extremas, a temperatura da mistura asfáltica chega a valores inferiores a 120°C, comprometendo diretamente a compactação e a qualidade final da pavimentação.

Tabela 2 - Resistência térmica (RT) de acordo com a estrutura construtiva.

Estrutura construtiva	Resistência térmica [K m ² / W]
Convencional – Chapa de aço carbono com 8 mm de espessura	0.00154143
Sanduíche com 8 mm de chapa + 5cm de lã de rocha + 2 mm de chapa	11,11

A perda de calor por condução na caçamba é de 2.352 kW na condição convencional e de 407 W na condição composta por chapa de aço carbono 8mm, lã de rocha 50mm e chapa de aço carbono de 2mm.

Na Tabela 3 encontram-se os valores relacionados à perda de calor por convecção na parte superior da caçamba. Considerou as condições externas de 33 °C e velocidade média de deslocamento de 80 km/h. Os valores do coeficiente de convecção foram obtidos pelos números adimensionais de Reynolds, Prandtl e Nusselt,[7]

Tabela 3 – Perdas de calor por convecção e radiação em caçamba de caminhão medindo 5m x 2,5m x 1,5m.

Condição da cobertura	Perda de calor por convecção [kW]	Perda de calor por radiação [KW]
Sem lona	$48,87 \cdot 12,5 \cdot (162,5 - 33) = 79,1$	19,52 ($\alpha=1$)
Com manta aluminizada (4mm)	$15 \cdot 12,5 \cdot (16,5 - 33) = 24,3$	3,9 ($\alpha=0,2$)

Com a implementação do sistema composto por manta aluminizada, estimou-se redução das perdas térmicas de 72% apenas na parte superior da caçamba.

Nos trajetos de 100 km, a perda de temperatura chega a aproximadamente 25 °C, permitindo manter a mistura asfáltica dentro da faixa ideal de aplicação.

4.3.2 Análise comparativa dos materiais isolantes

Durante o estudo, foram avaliados diferentes materiais com potencial aplicação em isolamento térmico de caçambas metálicas.

Os resultados demonstraram que a lã de rocha apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho térmico, resistência mecânica, resistência à vibração, durabilidade e viabilidade econômica.

Embora materiais como fibra cerâmica e espuma cerâmica apresentem baixa condutividade térmica, seus elevados custos de implementação inviabilizam sua aplicação prática em larga escala no transporte rodoviário de CBUQ.

A lã de rocha destacou-se principalmente pela elevada resistência a temperaturas superiores a 700°C, além da boa resistência mecânica frente às vibrações e impactos característicos do transporte rodoviário.

Além do desempenho térmico satisfatório, a solução também demonstrou maior viabilidade operacional devido à elevada resistência mecânica e térmica da lã de rocha em aplicações sujeitas à vibração e altas temperaturas.

4.3.3 Estimativa de implementação em carretas de transporte

O custo estimado para implementação do sistema completo de isolamento térmico foi calculado considerando:

- lã de rocha com espessura de 50 mm;
- manta aluminizada refletiva;
- chapas metálicas de proteção;
- fixadores e elementos de montagem;
- mão de obra de instalação e adaptação.

Adotando-se uma solução intermediária, estimou-se custo médio aproximado de R\$ 14.000,00 por carreta.

Tabela 4 – Estimativa de custo de implementação do isolamento térmico

Item	Valor Estimado
------	----------------

Lã de rocha	R\$2400 a R\$3600
Chapas de proteção	R\$3000 a R\$4400
Manta aluminizada	R\$400 a R\$800
Fixadores e acessórios	R\$1000 a R\$2000
Mão de obra e adaptação	R\$4000 a R\$7000
Custo total estimado	R\$10800 a R\$17800

Apesar do investimento inicial, verificou-se potencial redução de desperdícios operacionais, menor necessidade de retrabalhos e aumento da qualidade final da pavimentação, tornando o sistema economicamente viável no médio e longo prazo.

4.3.4 Validação técnica da solução proposta

A solução proposta apresenta viabilidade técnica compatível com as condições operacionais do transporte rodoviário de CBUQ, especialmente devido às características térmicas e mecânicas da lã de rocha.

Além da baixa condutividade térmica, a lã de rocha apresenta elevada resistência ao fogo, baixa degradação térmica e boa resistência mecânica frente às vibrações e impactos decorrentes do transporte em rodovias.

Outro fator relevante refere-se à facilidade de instalação e manutenção do sistema proposto, permitindo sua aplicação em carretas já existentes sem necessidade de alterações estruturais significativas.

A utilização de revestimento aluminizado refletivo também contribui para redução das perdas térmicas por radiação, complementando o desempenho do isolamento principal.

Dessa forma, a solução apresenta potencial aplicação prática em operações de pavimentação urbana e rodoviária de médio e grande porte.

4.3.5 Estimativa de retorno financeiro

Considerando redução média de desperdícios entre 5% e 15% por operação, estimou-se potencial economia operacional capaz de amortizar o investimento em isolamento térmico em médio prazo.

Em operações contínuas de pavimentação, a redução de retrabalhos, descarte de material e consumo adicional de combustível pode gerar economia significativa ao longo da vida útil da frota.

Dessa forma, o investimento estimado em aproximadamente R\$ 14.000,00 por carreta demonstra potencial retorno econômico operacional compatível com obras de médio e grande porte.

4.4 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos demonstram que a logística de transporte exerce influência direta sobre o desempenho operacional e a qualidade final da pavimentação asfáltica.

A análise evidenciou que a perda térmica do CBUQ não está associada apenas à distância entre usina e obra, mas também às condições de transporte, tempo de espera, sincronização operacional e ausência de sistemas adequados de conservação térmica.

A implementação do isolamento térmico mostrou-se uma solução tecnicamente eficiente para redução das perdas de calor durante o transporte. A combinação entre lã de rocha e manta aluminizada apresentou desempenho satisfatório frente aos mecanismos de condução e radiação térmica, reduzindo significativamente a transferência de calor para o ambiente externo.

A aplicação da lã de rocha reduz significativamente o coeficiente de condutividade térmica do sistema, diminuindo a transferência de calor entre a mistura asfáltica e o ambiente externo.

Além dos ganhos térmicos, observou-se potencial aumento da produtividade operacional, uma vez que a manutenção da temperatura adequada melhora a trabalhabilidade do material e reduz interrupções durante a aplicação.

Do ponto de vista econômico, embora exista investimento inicial para adaptação das carretas, os benefícios associados à redução de desperdícios, menor incidência de patologias precoces e aumento da durabilidade do pavimento indicam viabilidade técnica e financeira da solução proposta.

Os resultados também reforçam a importância da Engenharia de Produção na integração entre logística, planejamento operacional e controle de qualidade em obras de pavimentação asfáltica.

5. Conclusão

O presente trabalho permitiu analisar a influência da logística de transporte sobre a qualidade e eficiência da aplicação do Concreto Betuminoso Usinado a Quente

(CBUQ), evidenciando que as perdas térmicas durante o deslocamento representam um dos principais fatores responsáveis pela redução da qualidade da pavimentação asfáltica.

A partir do estudo realizado, verificou-se que fatores como tempo de transporte, condições das rotas, sincronização operacional e ausência de isolamento térmico adequado contribuem diretamente para a perda de temperatura da mistura asfáltica, comprometendo sua trabalhabilidade, compactação e desempenho estrutural.

Os resultados obtidos demonstraram que a implementação de sistemas de isolamento térmico nas caçambas de transporte apresenta elevado potencial de melhoria operacional. Entre os materiais avaliados, a lã de rocha associada à manta aluminizada destacou-se como a alternativa mais viável tecnicamente, devido à sua baixa condutividade térmica, elevada resistência mecânica e alta resistência às temperaturas do CBUQ.

As simulações realizadas indicaram redução das perdas térmicas entre 40% e 60%, permitindo preservar aproximadamente 15°C adicionais na massa asfáltica ao final do transporte.

Tal condição contribui diretamente para:

- Melhoria da compactação;
- Redução de segregações;
- Diminuição de retrabalhos;
- Aumento da durabilidade do pavimento;
- Redução de desperdícios operacionais.

Do ponto de vista econômico, estimou-se custo médio aproximado de R\$ 14.000,00 por carreta adaptada com isolamento térmico, valor considerado viável diante dos benefícios operacionais, redução de perdas e mitigação de falhas construtivas ao longo da vida útil do pavimento.

Conclui-se, portanto, que a otimização logística associada à implementação de isolamento térmico no transporte de CBUQ representa uma solução tecnicamente eficiente e economicamente viável, contribuindo significativamente para o aumento da qualidade, produtividade e sustentabilidade das operações de pavimentação asfáltica.

Além disso, o estudo reforça a importância da aplicação de conceitos da Engenharia de Produção na gestão de processos logísticos e operacionais, demonstrando

que melhorias relativamente simples podem gerar impactos expressivos na eficiência e desempenho das obras de infraestrutura rodoviária.

Além dos benefícios operacionais e econômicos observados, a solução proposta também apresenta potencial contribuição ambiental, uma vez que a redução de desperdícios e retrabalhos implica menor consumo energético e menor emissão de gases associados à produção de massa asfáltica.

Dessa forma, a aplicação de isolamento térmico no transporte de CBUQ demonstra não apenas viabilidade técnica e econômica, mas também alinhamento com princípios de sustentabilidade e eficiência operacional na engenharia de pavimentação.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como continuidade deste estudo, recomenda-se:

- Realização de ensaios experimentais em campo utilizando carretas adaptadas com isolamento térmico;
- Utilização de sensores IoT para monitoramento em tempo real da temperatura do CBUQ;
- Desenvolvimento de modelos computacionais de simulação térmica;
- Análise comparativa entre diferentes espessuras de isolamento;
- Avaliação econômica considerando ciclo de vida do pavimento;
- Estudo da aplicação de sistemas automatizados de gestão logística em obras de pavimentação.

Essas análises poderão contribuir para o aprimoramento das técnicas de conservação térmica e aumento da eficiência operacional no transporte de misturas asfálticas.

6. Referências Bibliográficas

1. BALLOU, R. H.: **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman; 2006.
2. CHOPRA, S.; MEINDL, P.: **Supply chain management: strategy, planning and operation**. 6. ed. pearson; 2016.

3. BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.: **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA; 2008.
4. CNT – Confederação Nacional do Transporte.: **Transporte rodoviário de cargas no Brasil**. Brasília; 2019.
5. SPETCH, L. P.; CERATTI, J. A. P.; NÚÑES, W. P.: **Misturas Asfálticas: propriedades e desempenho**. Porto Alegre: UFRGS; 2016.
6. SLACK, N.; BRANDON-Jones, A.; JOHNSTON, R.: **Administração da Produção**. 8. ed. São Paulo: Atlas; 2018.
7. INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.: **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC; 2014.