



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

APLICAÇÃO DE MATERIAL ESTABILIZADO COM EMULSÃO ASFÁLTICA (BSM) PARA RECUPERAÇÃO PROFUNDA DE PAVIMENTOS: ESTUDO DE CASO DA BR-381/MG

Raimi Costa da Silva¹; Thiago Gomes Galdino Leite¹; Diogo Bento de Moraes¹; Guilherme Rodrigues Linhares¹; Zila Maria Garcia Mascarenhas²; Kamilla Vasconcelos Savasini²; Celso Luiz dos Santo Romeiro Júnior¹; Mateus Wobeto¹

RESUMO

A reciclagem é uma técnica de recuperação utilizada há mais de 30 anos para a restauração da capacidade estrutural de pavimentos. Nesse contexto, o presente estudo de caso consiste no relato dos principais aspectos executivos da obra de reciclagem *in situ* com emulsão asfáltica realizada na rodovia BR-381/MG – Contorno de Betim, administrada pela Concessionária Fernão Dias. Tradicionalmente, o Grupo Arteris não empregava técnicas de reciclagem *in situ* em suas rodovias, no entanto, impulsionado por uma política interna voltada para práticas construtivas com menor impacto ambiental, mais especificamente na redução de emissões de gases do efeito estufa, optou-se pela reciclagem *in situ* como alternativa. O objetivo era maximizar a reutilização dos materiais existentes na rodovia e minimizar as atividades de transporte durante a obra. Diante das características do pavimento existente e das limitações operacionais da região, a escolha pela emulsão asfáltica visava mitigar os riscos de falha por fadiga típicos de bases cimentadas, além de possibilitar uma rápida liberação ao tráfego após a conclusão da obra. O estudo apresenta os aspectos mais relevantes do processo executivo, bem como os principais obstáculos enfrentados ao longo da obra. Desafios relacionados à heterogeneidade da estrutura existente e ao controle de qualidade foram superados e destaca-se que a solução adotada ofereceu vantagens em termos de agilidade, custo e logística.

PALAVRAS-CHAVE: pavimentação; reciclagem *in situ*; reconstrução

ABSTRACT

Recycling is a recovery technique used for over 30 years to restore the structural capacity of pavements. In this context, the present case study consists of reporting the main executive aspects of the *in situ* recycling work with asphalt emulsion carried out on the highway BR-381/MG - Contorno de Betim, managed by the Fernão Dias Concessionaire. Traditionally, the Arteris Group did not employ *in situ* recycling techniques on its highways; however, driven by an internal policy focused on construction practices with less environmental impact, specifically in reducing greenhouse gas emissions, *in situ* recycling was chosen as an alternative. The goal was to maximize the reuse of existing materials on the highway and minimize transportation activities during the work. Given the characteristics of the existing pavement and the operational limitations of the region, the choice of asphalt emulsion aimed to mitigate the risks of fatigue failure typical of cemented bases, as well as to allow quick traffic release after completion of the work. The study presents the most relevant aspects of the executive process, as well as the main obstacles faced during the work. Challenges related to the heterogeneity of the existing structure and quality control were overcome, and it is emphasized that the adopted solution offered advantages in terms of agility, cost, and logistics.

KEY WORDS: Pavement; *in situ* recycling, reconstruction

¹ Arteris Fernão Dias, raimi.silva@arteris.com.br; thiago.leite@arteris.com.br; diogo.morais@arteris.com.br; guilherme.linhares@arteris.com.br; celso.romeiro@arteris.com.br; mateus.wobeto@arteris.com.br.

² Universidade de São Paulo, kamilla.vasconcelos@usp.br; zilamascarenhas@usp.br.



INTRODUÇÃO

A reciclagem de pavimento com emulsão asfáltica é reconhecida como uma técnica promissora no contexto brasileiro para a melhoria e reabilitação de rodovias. Com o desafio crescente de manter e expandir a infraestrutura viária do país, a busca por soluções eficientes e sustentáveis torna-se fundamental. A reciclagem in situ, mais especificamente, oferece uma abordagem econômica e ambientalmente vantajosa, ao permitir a reutilização de materiais existentes na própria rodovia, minimizando assim os custos e impactos associados ao transporte de materiais virgens. O presente estudo de caso se propõe a apresentar o processo executivo da técnica de reciclagem in situ com emulsão asfáltica realizada na BR-381/MG- Contorno de Betim, bem como seus principais desafios.

CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO

O Contorno de Betim, escolhido como o segmento para a realização da obra, sobressai-se pela sua significativa importância como um corredor estratégico para a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) – com tráfego estimado em 9500 veículos comerciais/dia. O trecho faz parte da Concessionária Fernão Dias do Grupo Arteris, cuja localização estratégica ofereceu vantagens operacionais significativas, possibilitando a manutenção da faixa de trabalho fechada durante a execução da obra, minimizando os impactos no fluxo de veículos e garantindo a segurança dos usuários da via. Além disso, a proximidade do trecho com diversas bases logísticas, como distribuidores, refinarias, pedreiras e usinas, representou uma vantagem considerável na otimização do processo de construção e na redução de custos operacionais. É importante destacar que, apesar das vantagens oferecidas pelo local, o trecho foi escolhido por apresentar um nível elevado de criticidade estrutural (Figura 1).



Figura 1 – Trecho Experimental do Contorno de Betim antes da obra de reciclagem

Era de conhecimento prévio da Concessionária que boa parte do pavimento do Contorno de Betim era composto por camadas cimentadas, portanto optou-se pela reciclagem com emulsão asfáltica com o objetivo de diminuir os riscos de trincamento por fadiga. Em complemento, optou-se pelo desenvolvimento de uma emulsão asfáltica customizada aos materiais do local.

ETAPAS EXECUTIVAS

Ao todo foram executados cerca de 11 km de faixa com a solução de reciclagem in situ com emulsão asfáltica e 16 km de drenos de pavimento no Contorno de Betim, cuja duração foi de cerca de 79 dias. A seguir serão abordadas as principais etapas executivas do trecho experimental, começando com as sondagens de pavimento para avaliação das condições existentes. Em seguida, foi elaborado um projeto de mistura, levando em consideração as características do pavimento e os requisitos de



desempenho, e o dimensionamento da nova estrutura de pavimento. Posteriormente, foi realizada uma busca de fornecedores para os materiais e empreiteiros qualificados para a execução da obra. Durante a execução da obra, as atividades foram supervisionadas para assegurar a qualidade e o cumprimento dos padrões técnicos necessários.

Sondagens de pavimento

As sondagens foram realizadas para avaliar a composição e a condição da estrutura existente no local da obra. Tendo em vista a escolha da técnica de reciclagem in situ, essa etapa foi essencial para a definição da quantidade de projetos de mistura que deveriam ser desenvolvidos, a depender do tipo de material e da proporção de cada um deles. Em complemento, a sondagem foi realizada com uma fresadora (Figura 2), em busca de se obter materiais com uma característica similar à condição real da obra para realização do projeto de dosagem da mistura reciclada em laboratório. Foram realizadas nove sondagens ao total, cujos resultados podem ser visualizados na Tabela 1.



Figura 2 – Sondagens realizadas com a fresadora

Tabela 1 – Sondagens Contorno de Betim

Local	Tipo	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
0+200 Sul	Material	CAUQ	Solo brita	BGTC	Rachão
	Espessura (cm)	16,5	18	19	-
1+700 Sul	Material	CAUQ	BGTC	Solo arenoso vermelho	Solo argiloso
	Espessura (cm)	15	15	12	-
4+470 Sul	Material	CAUQ	Solo brita	Solo sem compactação	Argila
	Espessura (cm)	15	12	20	-
5+400 Sul	Material	CAUQ	BGTC	Solo brita	-
	Espessura (cm)	14	24	17	-
0+200 Norte	Material	CBUQ	BGTC	Argila vermelha	-
	Espessura (cm)	15	20	-	-
1+900 Norte	Material	CBUQ	BGTC	Argila vermelha	-
	Espessura (cm)	15	20	-	-
3+200 Norte	Material	CBUQ	BGTC	Argila vermelha	-
	Espessura (cm)	15	20	-	-
4+470 Norte	Material	CBUQ	BGTC	Canga	Argila
	Espessura (cm)	14	15	20	-
5+360 Norte	Material	CBUQ	BGTC	Canga	-
	Espessura (cm)	14	16	20	-



Projeto de mistura

Os materiais coletados na fase de sondagens foram enviados para a Distribuidora Greca Asfaltos, que não só elaborou os projetos de dosagem da BSM baseando-se na composição dos materiais do pavimento existente e nos horizontes de corte da recicladora in situ, mas também fez os ajustes necessários na formulação da emulsão para adequá-la aos materiais disponíveis. Os projetos seguiram a metodologia recomendada pela *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 2023), utilizando corpos de prova Marshall de 4" de diâmetro com adição de 1% de cimento Portland como filer ativo e diferentes taxas de emulsão asfáltica. Após a moldagem e a cura dos corpos de prova, foram realizados ensaios de Estabilidade Marshall e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) em condições secas e saturadas. O teor ótimo de adição de emulsão asfáltica foi determinado com base nas resistências mínimas alcançadas nos ensaios. Foram realizados quatro projetos, dos quais três foram utilizados no trecho experimental descrito posteriormente, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição dos projetos de mistura

Projeto	% em massa					
	RAP	BGTC	Solo-brita	Cimento	Emulsão	Água
1	20	79	-	1	3,6	3,3
2	40	59	-	1	3,5	2,8
3	52	-	47	1	4,0	4,3
4	40	-	59	1	4,3	4,3

Dimensionamento

A avaliação mecanicista da estrutura reciclada com emulsão, aqui denominada RECRap, seguiu a metodologia Sul-Africana conforme preconizado no *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials - A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials* (SABITA, 2020) para a camada estabilizada com emulsão (*Bitumen Stabilized material* - BSM) e no *South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014) para as demais camadas de pavimento.

O dimensionamento do BSM também necessitava de parâmetros do ensaio de compressão triaxial dos materiais que iriam compor a estrutura, dessa forma parte do material coletado nas sondagens também foram ensaiados para obtenção da coesão e do ângulo de atrito necessários ao modelo preconizado pelo manual Sul-africano (SABITA, 2020). Na

Tabela 3 podem ser verificados os principais resultados dos ensaios monotônicos triaxiais para os projetos de mistura desenvolvidos.

Tabela 3 – Resultados ensaios monotônicos triaxiais

Projeto	Coesão (c)	Coesão mantida (%)	Ângulo de atrito	Classificação TG2 (2009)
1	398	77	35,0	BSM1
2	294	62	40,6	BSM1
3	186	115	51,9	BSM2
4	206	100	47,9	BSM2

A avaliação das tensões e deformações foi conduzida utilizando o software de análise elástico linear AEMC, com o propósito de verificar as respostas do pavimento às cargas do tráfego. O tráfego foi calculado com base nas contagens classificatórias da concessionária, levando em conta os fatores de



equivalência de cargas definidos pelo SAPEM (2014), para determinar o Número N de repetições de carga do eixo padrão de 80 kN calculado com os Fatores de Equivalência da AASHTO conforme Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (DNIT, 2006). A caracterização das camadas do pavimento para essa análise mecânica considerou os resultados dos ensaios laboratoriais realizados nas misturas asfálticas recicladas, bem como as investigações geotécnicas conduzidas antes do início das obras de restauração. Para os quatro projetos de mistura reciclada foi realizado o ensaio triaxial dinâmico, para obtenção do módulo de resiliência, e o ensaio triaxial monotônico, para obtenção da coesão, da coesão mantida e do ângulo de atrito. Durante a execução da obra identificou-se que não haveria necessidade de execução do Projeto 4, portanto a estrutura dimensionada para o RECRap para os demais projetos pode ser verificada na Tabela 4.

Tabela 4 – Estruturas dimensionadas RECRap

Projeto	Camada	Sigla	Descrição	Espessura (cm)	Vida útil
Projeto 1	Rolamento	CAUQbor	CAUQ SPV 16mm com CAP modificado por Borracha	5,0	9 anos (5,08E+07)
	Base	BSM	Base Reciclada com Emulsão - Projeto 1	30,0	
	Sub-base	ARGverm	Argila Vermelha	20,0	
	CFT	Subleito	CBR \geq 6%	-	
Projeto 2	Rolamento	CAUQbor	CAUQ SPV 16mm com CAP modificado por Borracha	5,0	6 anos (3,30E+07)
	Base	BSM	Base Reciclada com Emulsão - Projeto 2	30,0	
	Sub-base	ARGverm	Argila Vermelha	20,0	
	CFT	Subleito	CBR \geq 6%	-	
Projeto 3	Rolamento	CAUQbor	CAUQ SPV 16mm com CAP modificado por Borracha	5,0	9 anos (5,08E+07)
	Base	BSM	Base Reciclada com Emulsão - Projeto 3	30,0	
	Sub-base	ARGverm	Argila Vermelha	20,0	
	CFT	Subleito	CBR \geq 6%	-	

Execução da obra

Nesta seção será apresentado o processo executivo realizado. Como primeira etapa, realizou-se a fresagem de 5 cm da camada de revestimento do pavimento asfáltico existente no segmento a ser reciclado, repetindo-se duas vezes por faixa devido ao limite de largura da fresadora (2 m) em comparação com a média de largura da faixa (3,8 m). A fresagem resultou em uma camada de Concreto Asfáltico Usinado a quente (CAUQ) remanescente, como esperado, devido à espessura média da camada de superfície do pavimento anterior, que era de 15 cm. Esse processo foi necessário para permitir a restauração do pavimento sem alterar o greide da rodovia. O material fresado foi transportado ao "bota-espera" localizado a 9 km de distância. Posteriormente, foi realizado o espalhamento de cimento Portland CII-E seguido pelo uso da recicladora WR240 e de caminhões com emulsão asfáltica. Em seguida, ocorreu a compactação por rolos compactadores pé de carneiro, motoniveladora, rolo de pneu e rolo liso. Importante destacar que, tendo em vista a alta espessura da camada de BSM, o rolo pé de carneiro adotado foi da classe de 20 toneladas visando maior eficácia no processo de compactação, mitigando o surgimento de deformações após abertura ao tráfego. Após a devida compactação da mistura reciclada, a camada reciclada permaneceu exposta sem receber a camada de revestimento por pelo menos quatro dias, permitindo a cura da camada para conferir maior rigidez inicial ao material antes da liberação ao tráfego. Em seguida, foi necessária uma fresagem fina na camada reciclada para garantir a irregularidade longitudinal (IRI) da rodovia no limite de 1,6 m/km preconizado pela especificação particular do grupo Arteris. A aplicação da camada de revestimento de 5 cm de CAUQ foi realizada por meio de uma vibro acabadora, após a



aplicação e ruptura da pintura de ligação com emulsão, feita por um caminhão espargidor com taxa de 1,0L/m². A compactação da camada de CAUQ foi realizada com o uso de rolo de pneu e rolo liso. A Figura 3 apresenta algumas etapas da restauração do pavimento com a técnica de reciclagem profunda a frio com emulsão asfáltica. Destaca-se ainda que em toda a extensão do trecho reciclado foram executados drenos longitudinais de pavimento, a fim de reduzir os riscos de infiltração de água na camada reciclada e garantir a durabilidade da solução.



Figura 3 - (a) Fresagem superficial do CAUQ; (b) Espalhamento do cimento; (c) Comboio Tanque Emulsão e Recicladora; (d) Aspecto trecho após a passagem da Recicladora; (e) Comboio Rolos Compactadores; (f) Aspecto final camada reciclada

Controle e Verificação de Qualidade

Devido à natureza única do serviço de reciclagem in situ com emulsão asfáltica, foi necessário adaptar os procedimentos convencionais de controle e verificação de qualidade. Essas adaptações foram essenciais para abordar a variabilidade dos materiais e das espessuras dos pavimentos, além de atender aos objetivos de sustentabilidade e eficiência do projeto.

- Controle Granulométrico e Velocidade de Avanço da Recicladora: O controle da qualidade começava com o ajuste do tambor fresador da recicladora e testes em diferentes velocidades de avanço. Amostras eram coletadas para verificar se a granulometria se aproximava da especificada no projeto. Este controle pré-executivo determinava a velocidade ideal de avanço, evitando a necessidade de verificações futuras para aceitação ou rejeição do material.
- Determinação e Controle da Taxa de Espalhamento de Cimento: Utilizando as amostras do controle granulométrico, coletadas antes da adição de emulsão asfáltica, era realizada a compactação em cilindro Proctor para determinar a máxima densidade para cada seção do pavimento. Essa informação era utilizada para definir a taxa de espalhamento de cimento por m² ideal para cada segmento, que era controlada rigorosamente medindo a massa de cimento distribuída sobre uma área conhecida.

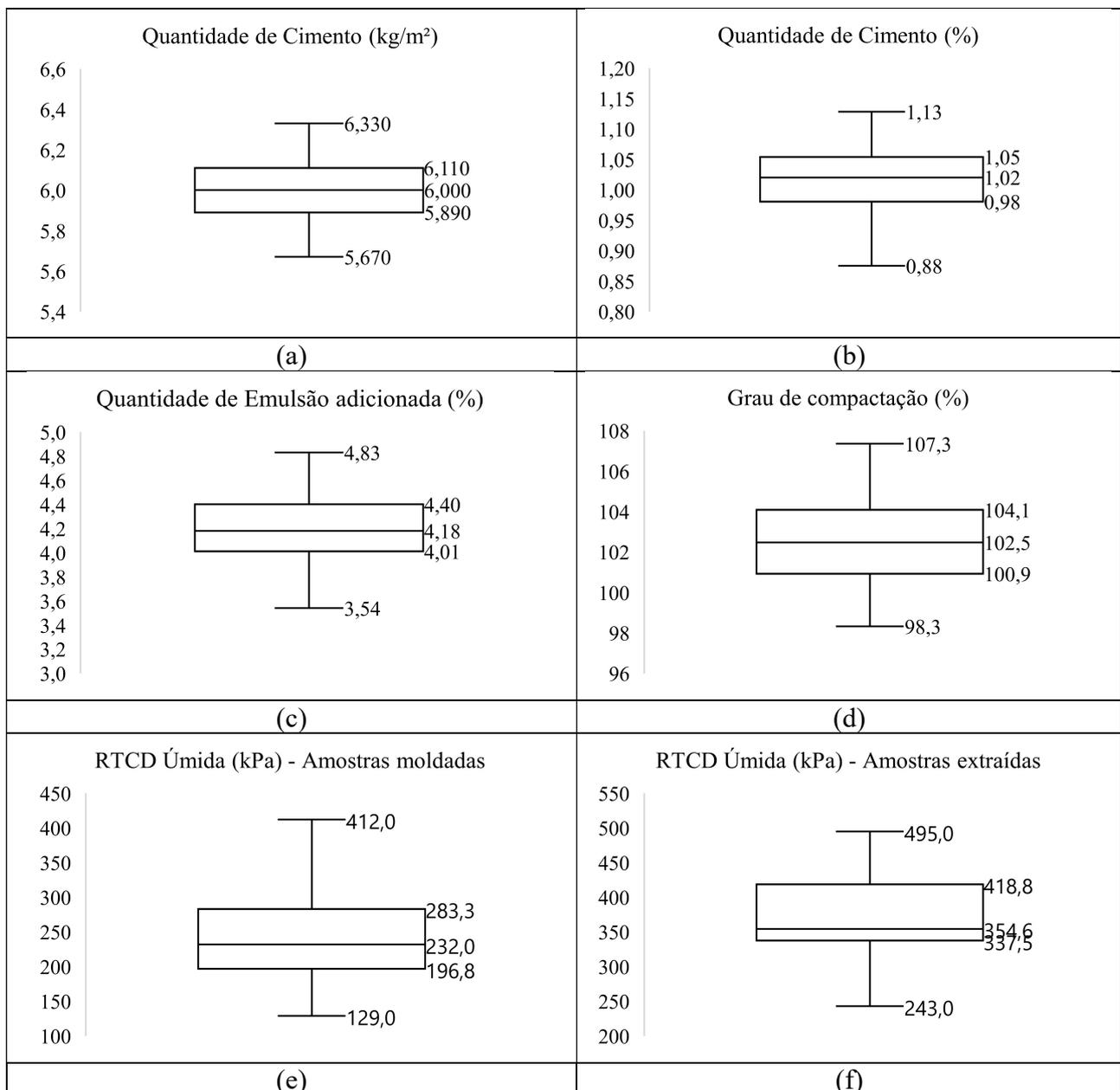


- Controle da Aplicação de Emulsão Asfáltica: Ao invés dos métodos convencionais que envolvem a extração de CAP, o controle da quantidade de emulsão asfáltica foi realizado pelo monitoramento do consumo real. Os caminhões de emulsão eram pesados antes e depois da aplicação, e a distribuição transversal da emulsão era verificada visualmente para garantir homogeneidade. O teor de ligante asfáltico residual permitido variava de -0,3% a +0,4% em relação ao valor definido em cada projeto de dosagem.
- Controle de Compactação: Imediatamente após a passagem da recicladora com adição e homogeneização da emulsão asfáltica, amostras eram coletadas para realizar curvas de compactação em cilindro Proctor e comparar com a densidade obtida in situ pelo método do frasco de areia. Os dados obtidos deveriam apresentar um grau de compactação igual ou superior a 97%, quando tratados estatisticamente, assegurando a adequada consolidação do material reciclado.
- Controle de Resistência à Tração: Inicialmente, o controle da resistência à tração foi realizado com amostras coletadas imediatamente após a passagem da recicladora. Estas amostras eram moldadas em cilindro Marshall e condicionadas em laboratório para promover a cura da emulsão. Para avaliar a resistência, um conjunto de corpos de prova era rompido na condição úmida e outro conjunto na condição seca, embora os critérios de aceitação da obra fossem baseados exclusivamente nos resultados obtidos na condição úmida. Neste caso, a resistência à tração por compressão diametral deveria ser no mínimo de 230 KPa. Devido a alguns resultados iniciais que não atendiam aos requisitos mínimos de resistência, com valores consideravelmente baixos, optou-se por realizar verificações adicionais nos casos discrepantes. A extração de amostras diretamente da pista foi adotada como uma medida de verificação, considerando que a condição real da pista é o indicador mais confiável. Como a camada de rolamento com Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) não era aplicada imediatamente após a reciclagem, houve tempo suficiente para a cura adequada da emulsão, resultando em todos os resultados subsequentes satisfazendo os critérios estabelecidos.
- Controle de Espessura da camada reciclada: A espessura da camada reciclada era controlada utilizando linha e trena. Durante essas verificações, também se avaliava a homogeneidade da aplicação da emulsão ao longo de toda a espessura da camada. O controle executado demonstrou que a recicladora utilizada possuía alta precisão neste quesito, e a avaliação da homogeneidade da emulsão foi satisfatória, não sendo a espessura da reciclagem nem a distribuição da emulsão fontes de preocupação.
- Controle da Camada de rolamento executada com CBUQ: O controle de qualidade da camada de rolamento executada com CBUQ seguiu os procedimentos convencionais. A avaliação do teor de CAP foi realizada a cada 100 toneladas de material produzido, por extração, com uma tolerância de variação de 0,2% em relação ao teor ótimo definido no projeto de dosagem. Adicionalmente, foi realizado o controle do volume de vazios na camada, que deveria estar entre 3% e 7%. Este rigor no controle assegurava que a camada de rolamento atendesse aos padrões de qualidade necessários para a durabilidade e o desempenho adequado do pavimento.
- Controle de Irregularidade Longitudinal: A irregularidade longitudinal da camada era avaliada com o uso de um perfilômetro a laser, garantindo que a superfície final atendesse ao critério de irregularidade máxima admissível de 1,6 m/km.
- Controle Deflectométrico: para fins de acompanhamento, o controle deflectométrico foi realizado a cada 10 metros. Contudo, não foi estabelecida uma exigência de valor devido à variabilidade identificada no trecho da obra.



Na Tabela 5 são apresentados resumidamente os resultados das principais verificações de qualidade realizadas. Na figura 4 é apresentado um histograma do IRI medido a cada 10 m do Contorno de Betim antes da obra (abril/2023) e cinco meses após a conclusão da obra (março/2024). Na Tabela 6 os dados podem ser verificados de forma mais detalhada por faixa e por sentido.

Tabela 5 - Boxplots com os resultados obtidos nas verificações de qualidade: (a) quantidade de cimento espalhada na superfície, kg/m²; (b) quantidade de cimento total incorporada na camada de base, %; (c) quantidade de emulsão incorporada na base reciclada, %; (d) Grau de compactação aferido, %; (e) Resistência à tração por compressão diametral de amostras moldadas, kPa; (f) Resistência à tração por compressão diametral de amostras extraídas, kPa.



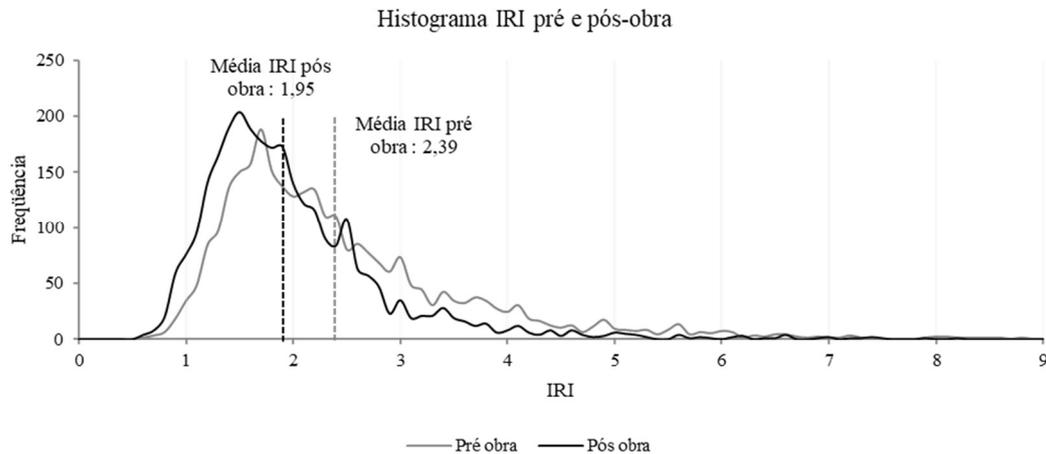


Figura 4 – Histograma do IRI do Contorno de Betim

Tabela 6 – Resumo dos dados de IRI pré e pós-obra por faixa e sentido

	SUL FAIXA 1		SUL FAIXA 2		NORTE FAIXA 1		NORTE FAIXA 2	
Total de kmf reciclado	0,6		5,3		0,3		5,6	
IRI	Pré obra	Pós obra	Pré obra	Pós obra	Pré obra	Pós obra	Pré obra	Pós obra
Média	2,10	1,80	2,80	1,89	2,00	1,99	2,67	2,10
Mediana	1,88	1,69	2,38	1,72	1,84	1,90	2,36	1,70
Desvio padrão	0,96	0,66	1,45	0,85	0,76	0,70	1,27	1,25
Mínimo	0,68	0,60	0,76	0,60	0,60	0,57	0,67	0,60
Máximo	11,00	6,02	10,35	7,15	7,29	4,93	8,53	9,98

Com base nos dados apresentados na Tabela 6, é notável uma redução significativa no Índice de Regularidade Internacional (IRI) nas faixas 2 de ambos os sentidos, resultando em uma diminuição média de 32% no sentido Sul e 21% no sentido Norte após a conclusão da obra. Essa melhoria é especialmente devida à concentração das obras nas faixas com tráfego mais intenso. Destaca-se ainda que a estratégia de realizar uma fresagem fina após a aplicação da BSM desempenhou um papel crucial na obtenção desses resultados. Nos dados pós-obra, notou-se ainda uma redução no desvio padrão, indicando uma maior uniformidade nos dados de IRI após as intervenções.

PRINCIPAIS DESAFIOS

Durante a execução da obra, enfrentaram-se uma série de desafios que exigiram soluções alternativas para garantir o sucesso do projeto. Um dos principais obstáculos foi lidar com a variedade de materiais encontrados na estrutura do pavimento, que incluíam BGTC (Brita Graduada Tratada com Cimento), BGS (Brita Graduada Simples) e Solo Brita. Apesar das sondagens prévias, a variabilidade de materiais ocorreu com mais frequência do que o esperado, assim como a variação de espessura da camada, que foi diferente das já mapeadas nas sondagens prévias. Tal fato exigiu uma abordagem cuidadosa durante o processo de reciclagem, visando garantir a qualidade e a durabilidade da nova camada de pavimento.

O entupimento dos bicos da recicladora também representou um grande desafio durante a execução da obra. Nos trechos de reciclagem, notaram-se afundamentos na camada de CAUQ, mesmo sem a liberação do tráfego. Ao verificar o local, foi evidente um excesso de emulsão em certos pontos e uma falta de homogeneidade em alguns segmentos (Figura 5a), apesar da taxa de aplicação da



emulsão seguir os projetos de mistura. Após uma colaboração entre os envolvidos no projeto, identificou-se que a emulsão asfáltica, quando armazenada de um dia para o outro, formava uma "borra" que entupia os bicos da recicladora (Figura 6a). Para resolver esse problema, foi necessário criar um dispositivo de filtro específico (Figuras 6b e 6c) e realizar manutenção e limpeza constante dos equipamentos. Após a implementação do filtro, a emulsão foi distribuída de forma homogênea (Figura 5b).



Figura 5 - (a) trecho com a emulsão com aspecto heterogêneo; (b) Trecho com a emulsão com aspecto homogêneo

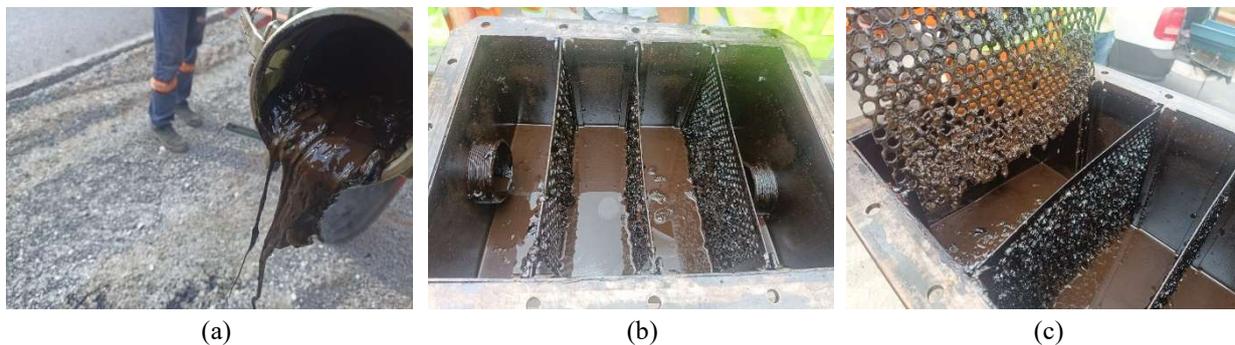


Figura 6 - (a) "borra" identificada na emulsão; (b) Filtro desenvolvido; (c) Detalhe do Filtro desenvolvido

Além disso, a calibração da taxa de emulsão e cimento foi um ponto crítico, pois um equilíbrio preciso entre esses materiais era essencial para garantir a estabilidade e resistência adequadas da nova estrutura. Por se tratar de um processo *in situ*, houve necessidade de ajustar a forma de espalhamento, onde foram realizados testes variando a velocidade do caminhão distribuidor de cimento e a abertura da caixa de distribuição, realizando as conferências da taxa de cimento até que fosse possível obter a taxa especificada no projeto.

Outro ponto importante foi a elevada rigidez da camada de BGTC existente, que dificultou sua reciclagem e reutilização. A recicladora teve a sua produtividade reduzida nesses locais, sendo necessária uma manutenção mais intensa para a troca dos bits que se desgastaram muito rapidamente, assim como um cuidado na taxa de aplicação da emulsão, visto que o avanço do equipamento era mais lento. Durante o processo foi necessário ajustar os parâmetros do processo de reciclagem, como a taxa de aplicação de emulsão e cimento, para garantir uma mistura adequada e homogênea.

A largura da faixa de trabalho da recicladora e a necessidade de fechar totalmente a pista também constituíram desafios logísticos consideráveis, demandando um planejamento minucioso e uma coordenação eficaz entre as equipes de trabalho da Concessionária, da empreiteira e das autoridades



rodoviárias. Essas medidas foram fundamentais para mitigar o impacto no tráfego e assegurar a segurança tanto dos trabalhadores quanto dos usuários da rodovia.

Por fim, ressalta-se que os aspectos relatados acima diminuíram a produção inicial da obra, porém após a superação das dificuldades iniciais e ajustes foi possível confirmar que a técnica é uma alternativa viável para reabilitação de pavimentos para as Concessionárias do Grupo Arteris, tanto pela capacidade de melhoria das condições estruturais quanto pela velocidade de execução da obra. Na Figura 7 é ilustrada a curva de aprendizado do trecho experimental, em que é possível identificar que após o domínio da técnica, cerca de 66% do volume de camada reciclada foi executado em apenas um mês de obra.

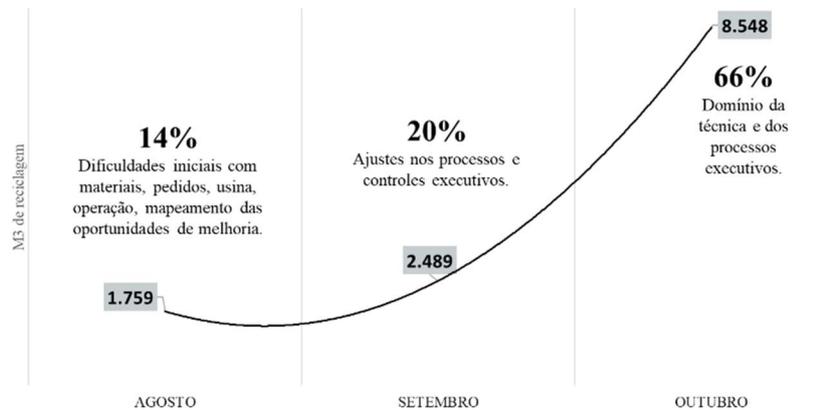


Figura 7 - Curva de aprendizado da obra

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de caso relatou o processo executivo de reciclagem in situ com emulsão asfáltica na rodovia BR-381/MG – Contorno de Betim e ofereceu uma visão abrangente sobre os aspectos operacionais, técnicos e logísticos envolvidos nessa técnica de reabilitação de pavimentos. Ao longo do estudo, foram identificados e superados diversos desafios, desde a heterogeneidade da estrutura existente até questões relacionadas ao controle de distribuição dos materiais. Destaca-se a importância de considerar a reciclagem in situ com emulsão asfáltica como uma alternativa viável e vantajosa para a reabilitação de pavimentos, não apenas em termos de sustentabilidade ambiental, mas também em termos de eficiência operacional e econômica. Espera-se que as lições aprendidas ao longo deste processo possam orientar futuros projetos de reabilitação, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias cada vez mais eficazes e sustentáveis na gestão da infraestrutura rodoviária.

AGRADECIMENTOS

À Greca Asfaltos pelo fornecimento da emulsão asfáltica, desenvolvimento do Projeto de Mistura e apoio técnico prestado durante o Projeto.

À Neovia Engenharia, responsável pela execução da obra.

À Ingevity pelo apoio técnico prestado durante o Projeto.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRA. Recommended Mix Design Guidelines for Full Depth Reclamation (FDR) Using Emulsified Asphalt Stabilizing Agent FDR201A. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – Manual de restauração de pavimentos asfálticos, publicação IPR-720, segunda edição, IPR, Rio de Janeiro, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – Manual de estudos de tráfego, publicação IPR-723, IPR, Rio de Janeiro, 2006.

SOUTHERN AFRICAN BITUMEN ASSOCIATION (SABITA). *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials - A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials*. TG2. Third Edition. 2020. ISBN 978-1-874968-77-1

WIRTGEN GROUP. *Wirtgen Cold Recycling Technology*. First Edition. 2012.