

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Bruno Cardoso Vieira

Análise da Viabilidade do Uso de Pré-Misturados a Frio em
Aeródromos

Trabalho de Graduação
2009

Civil

BRUNO CARDOSO VIEIRA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE PRÉ-MISTURADOS A FRIO EM
AERÓDROMOS**

Orientador

Prof. Dr Régis Martins Rodrigues (ITA)

Co-orientador

Capitão Engenheiro Frank Cabral de Freitas Amaral (Comissão de Aeroportos da Região
Amazônica)

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

COMANDO-GERAL DE TECNOLOGIA AEROESPACIAL

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Vieira, Bruno Cardoso

Análise da Viabilidade do Uso de Pré-Misturados a Frio em Aeródromos

/ Bruno Cardoso Vieira.

São José dos Campos, 2009.

104f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2009. Orientadores: Prof. Dr. Régis Martins Rodrigues (ITA), Cap. Eng. Frank Cabral de Freitas Amaral (COMARA)

1. Análise de Viabilidade. 2. Pré-Misturado a Frio. 3. COMARA. I. Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. de Engenharia Civil. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIEIRA, Bruno Cardoso. **Análise da Viabilidade do Uso de Pré-Misturados a Frio em Aeródromos**. 2009. 104f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bruno Cardoso Vieira

TÍTULO DO TRABALHO: Análise da Viabilidade do Uso de Pré-Misturados a Frio em Aeródromos

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2009

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Bruno Cardoso Vieira

Rua Marechal Antônio de Souza, 1412 – Jardim América

21240-430 – Rio de Janeiro - RJ

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE PRÉ-MISTURADOS A FRIO EM AERÓDROMOS

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação.



Bruno Cardoso Vieira
Autor



Prof. Dr. Régis Martins Rodrigues (ITA)
Orientador



Capitão Engenheiro Frank Cabral de Freitas Amaral (Comissão de Aeroportos da Região
Amazônica)
Co-orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto (ITA)
Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 25 de novembro de 2009.

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre cercou-me de cuidados, carinho e amor, essenciais para minha jornada até aqui.

Ao meu pai, por sempre acreditar que era possível, mesmo nos momentos mais difíceis.

Por me dar acesso àquilo que considera o maior e mais precioso bem: a educação.

Ao meu irmão, que do seu jeito discreto sempre torceu e torce pelo meu sucesso.

Aos meus avós, por me acolherem, contribuindo para que este sonho se tornasse realidade.

A Tia Inês e a Vovó Catarina, por me ajudarem tanto durante esse caminho difícil, provando que amor vai muito além de laços familiares.

Ao meu amigo Júnior, por me apresentar o ITA e me convencer de que eu era capaz.

Aos meus queridos amigos Carla e Haroldo, por me ajudarem em tantos momentos de dificuldade ao longo dos últimos anos.

Ao grande amor da minha vida, Danielle, por me acompanhar durante todos estes anos, sempre ao meu lado. Obrigado por dividir comigo medos, expectativas, alegrias e sonhos. Por fazer nosso amor cada dia mais forte. Por me amar exatamente como eu sou. Obrigado por existir na minha vida. Eu te amo.

Agradecimentos

Ao final desta longa jornada, gostaria de oferecer meus agradecimentos:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Régis Martins Rodrigues (ITA), por me fornecer os ensinamentos necessários para a confecção deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Engº. MSc. Frank Cabral de Amaral (COMARA), por ajudar a fornecer os subsídios necessários para a realização do trabalho.

Ao Primeiro-Sargento Senna (COMARA), por fornecer informações precisas para sobre sua experiência em obras na amazônia, em especial no caso de Jacareacanga-PA.

A Companhia Brasileira de Asfalto da Amazônia (CBA), por fornecer materiais necessários para a realização deste TG.

Ao Engº. MSc. Rodrigo Tavares Ribeiro (COMARA), por estar sempre disponível a esclarecer dúvidas sobre o trabalho.

*“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida,
a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita
determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus,
que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”*

(Ayrton Senna)

Resumo

O presente trabalho de graduação tem por objetivo realizar a análise de viabilidade da utilização de misturas asfálticas pré-misturadas a frio como solução em revestimentos de pistas de pouso e decolagem da região amazônica. O procedimento de análise baseia-se em: (1) um estudo comparativo entre o pré-misturado a frio (PMF) e o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), enumerando-se as principais vantagens e desvantagens de cada alternativa, (2) análise computacional, utilizando-se o software WFLAPS, para a observação da resistência ao trincamento por fadiga de três tipos de revestimentos dosados pelo método Marshall (PMF convencional, PMF modificado por polímero e CBUQ) e (3) um estudo de caso, baseado na experiência da COMARA no aeroporto de Jacareacanga-PA no ano de 1999, onde houve uma tentativa má sucedida de utilização do PMF como revestimento da pista de pouso e decolagem do aeródromo da localidade. Através da metodologia de análise apresentada, encontram-se resultados que confirmam a viabilidade de utilização do PMF modificado com polímero como revestimento em pistas de aeródromos da região amazônica.

Palavras Chave: Análise de viabilidade. PMF. Pré-misturado a frio. COMARA. Aeródromos. Revestimento. Pista de pouso e decolagem.

Abstract

This graduation thesis aimed to evaluate the viability of using cold mixture asphalt concrete as a solution to the coating of aerodromes runways conducted in the Amazon. The analysis procedure consists of: (1) a study comparing PMF to CBUQ, enumerating the main advantages and disadvantages of each alternative, (2) computational analysis, using WFLAPS software, to observe the resistance to fatigue cracking from 3 types of dosed coatings by Marshall method (ordinary PMF, polymer-modified PMF and CBUQ) and (3) a case-study, based on COMARA experience on an airport in Jacareacanga-PA in the year of 1999, where has been a failed attempt to use PMF as a coating for the local runway. By using the presented methodology, there's been results that confirm the viability of using the polymer-modified PMF as a coating for runways in the Amazon.

Key Words: Viability, PMF, cold mixture asphalt concrete, COMARA, Airport, Coating, Runway.

Lista de Figuras

Figura 1 - Constituintes de uma mistura asfáltica	33
Figura 2 - Fluxograma do projeto de um PMF	42
Figura 3 - Processo de construção de uma camada de PMF	46
Figura 4 - Esquema de uma central a frio (SANTANA, 1992).....	47
Figura 5 - Procedimento correto de saída do misturador no caminhão (SANTANA, 1992) ..	48
Figura 6 - Usina Móvel (SANTANA, 1992).....	48
Figura 7 - Esquema de uma vibro acabadora automotriz (SANTANA, 1992)	49
Figura 8 - Acabadora rebocada (SANTANA, 1992).....	50
Figura 9 - Rolo liso tandem	51
Figura 10 - Rolo vibratório pneumático	51
Figura 11 - Acervo de obras realizadas pela COMARA (AMARAL, 2009).....	53
Figura 12 - Posição geográfica das localidades (AMARAL, 2009).....	55
Figura 13 - Problemas enfrentados na obra durante época de chuva (AMARAL, 2009)	56
Figura 14 - Distribuição climática da região amazônica (AMARAL, 2009)	57
Figura 15 - Transporte realizado por balsas (AMARAL, 2009)	60
Figura 16 - Tempo para alcançar as diversas localidades (AMARAL, 2009)	63
Figura 17 - Tela de entrada do software WFLAPS (parâmetros gerais)	69
Figura 18 - Tela de entrada do software WFLAPS (dados da camada)	70
Figura 19 - Usina PMF	74
Figura 20 - Caminhão basculante	75
Figura 21 - Vibroacabadora.....	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Aplicação das Emulsões por Tipo de Serviço	24
Tabela 2 - Propriedades EAs modificadas por polímeros	26
Tabela 3 - Classificação de acordo como teor de vazios	31
Tabela 4 - Evolução do volume de vazios	41
Tabela 5 - Presença atual da COMARA.....	54
Tabela 6 - Período de navegabilidade dos rios	58
Tabela 7 - Comparação de custos unitários	67
Tabela 8 - Parâmetros da lei de fadiga	69
Tabela 9 - Parâmetros das camadas	71
Tabela 10 - Valores de deformação obtidos	71
Tabela 11 - Valores de N_f para cada revestimento analisado	71
Tabela 12 - Valores de N para trincamento em 20 anos.....	72
Tabela 13 - Valores de Estabilidade Marshall.....	72

Lista de Abreviaturas

AMP: Asfalto modificado por polímero.....	
CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo.....	
CBUQ: Concreto betuminoso usinado a quente.....	
COMAER: Comando da Aeronáutica	
COMARA: Comissão de Aeroportos da Região Amazônica.....	
COMGAR: Comando-Geral de Operações Aéreas	
DACO: Destacamentos de Apoio da COMARA	
EA: Emulsão Asfáltica	
EAA: Emulsão Asfáltica Aniônica.....	
EAC: Emulsão Asfáltica Catiônica	
EMA: Etileno-acrilato de metilo	
EPDM: Polipropileno atático.....	
ER: Resina epoxídica.....	
EVA: Etileno-acetato de vinila.....	
FAB: Força Aérea Brasileira	
FUNAI: Fundação Nacional do Índio	
IBP: Instituto Brasileiro de Petróleo.....	
INFRAERO: Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária.....	
MR: Módulo de Rigidez.....	
OSU: Oregon State University	
PAVIMAQ: Pavilhão de Máquinas.....	
PE: Polietileno	
PET: Politereflato de etileno.....	
PMF: Pré-misturado a frio.....	
PMFA: Pré-misturado a frio aberto	
PMFD: Pré-misturado a frio denso.....	
PMFsD: Pré-misturado a frio semi-denso	
PP: Polipropileno.....	
RL: Ruptura Lenta.....	
RM: Ruptura Média.....	
RR: Ruptura Rápida	

SBR: Borracha estireno-butadieno

SBS: Estireno-butadieno-estireno

SPVEA: Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia

SSF: Segundos Saybolt Furol

SUDAM: Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia.....

Sumário

1 Introdução	15
1.1 Contextualização.....	15
1.2 Justificativa e relevância do trabalho	17
1.3 Estruturação do Trabalho	18
2 Conceitos básicos sobre PMF	19
2.1 Introdução	19
2.2 Emulsão Asfáltica	19
2.2.1 Processo de Emulsificação	20
2.2.2 Classificação	21
2.2.3 Cuidados em relação às EAs.....	22
2.2.4 Principais Vantagens das EAs.....	23
2.2.5 Aplicações.....	23
2.2.6 Emulsões Asfálticas Modificadas por Polímeros	24
2.3 Os Agregados	26
2.3.1 Classificação	27
2.3.2 Características	29
2.4 Misturas Asfálticas	30
2.4.1 Classificação	30
2.4.2 Parâmetros Físicos Intervenientes	32
2.4.3 Comportamento Reológico e Hidráulico	36
2.5 Misturas asfálticas a frio.....	38
2.5.1 Aspectos funcional, estrutural e hidráulico dos PMFs.....	38
2.5.2 Dosagem – Metodologia Marshall.....	42
2.5.3 Construção de camadas	45
3 Abordagem Logística Sobre Aeroportos da Amazônia.....	52
3.1 Histórico	52
3.2 Panorama Atual.....	54
3.2.1 Localidades.....	54
3.2.2 Clima.....	56
3.2.3 Regime Hidrográfico	58
3.2.4 Transporte.....	59

3.2.5 Aquisição de Insumos.....	61
3.2.6 Aspectos Operacionais	61
3.2.7 Mão-de-obra.....	62
4 Análise de Viabilidade.....	64
4.1 Introdução	64
4.2 Vantagens e Desvantagens	65
4.3 Contextualização para os aeródromos da região amazônica	67
4.4 Análise de fadiga.....	68
4.5 Utilização de PMF na COMARA.....	73
4.5.1 Introdução	73
4.5.2 Depoimento	73
4.5.3 Motivo do insucesso	77
5 Considerações finais	79
5.1 Síntese do trabalho	79
5.2 Limitações do modelo proposto.....	80
5.3 Sugestões para trabalhos futuros	81
Referências	82
Anexo A – Composição de custos das misturas	84
Anexo B – Projeto das misturas	88
Apêndice A – Telas do software WFLAPS.....	102

1 Introdução

1.1 Contextualização

A camada de revestimento tem fundamental importância no desempenho de um pavimento aeroportuário, sendo influenciada por fatores que vão desde o tipo de material utilizado até a qualidade da execução na obra. O papel dos custos totais envolvidos em uma obra de pavimentação tem grande relevância fazendo com que seu gerenciamento seja essencial na tomada de decisão na fase de projeto do pavimento. Assim, o uso de novas alternativas de revestimentos asfálticos pode trazer diversos benefícios relevantes, tanto em relação a custos, quanto aos variados impactos causados nas diversas etapas da pavimentação de pistas de pouso e decolagem de aeródromos.

Inserido neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade do uso de Pré-misturado a Frio (PMF) como mistura asfáltica nas obras aeroportuárias realizadas pela Comissão de Aeroportos da Região Amazônica (COMARA).

A COMARA tem como missão:

Projetar, Construir, Equipar e Recuperar os Aeroportos da Região Amazônica ou em Outras Regiões do País e Executar Obras Cíveis para Órgãos da Administração Federal, Estadual ou Municipal Mediante Convênios, desde que Sejam do Interesse do Comando da Aeronáutica. (COMARA 50 ANOS, 2007, p. 32).

A COMARA surgiu a partir da iniciativa do então Brigadeiro-do-ar Eduardo Gomes, que ao perceber a importância do transporte aéreo como fator de interação social e comercial para a região amazônica, propôs um projeto para construção de novas pistas nesta localidade. Tal projeto ganhou força com o surgimento do Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia (SPVEA), que mais tarde daria origem à Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM). Contudo, foi a união de esforços da Força Aérea Brasileira (FAB) com o SPVEA, em 1955, que impulsionou a criação da COMARA em 12 de dezembro de 1956, através do decreto de número 40.551, assinado pelo presidente Juscelino Kubitschek. Atualmente a COMARA é subordinada ao Comando Geral de Operações Aéreas (COMGAR) e seu trabalho estende-se por todas as regiões do país.

Para a realização de sua missão, a COMARA conta com uma infra-estrutura que se estende por toda a região amazônica, onde se pode destacar:

- Sede em Belém-PA, onde se encontra toda a estrutura administrativa da instituição;
- Três Destacamentos de Apoio (DACO), localizados em Manaus-AM, Tabatinga-AM e São Gabriel da Cachoeira-AM, para apoio as obras regionais;
- O Pavilhão de Máquinas (PAVIMAQ), localizado em Belém-PA, que atua como ponto de estocagem, distribuição e manutenção de maquinário;
- Dois portos fluviais, localizados em Belém-PA (Porto Fluvial Brucutu) e Manaus-AM (Porto Fluvial de Manaus);
- Duas pedreiras, uma localizada em Moura-AM e a outra em Monte Alegre-PA, que atuam como pontos de obtenção de brita, recurso de grande escassez na região amazônica.

A COMARA é a única organização do Comando da Aeronáutica (COMAER) que realiza obras de grande porte através de administração direta, diferentemente das outras organizações que normalmente contratam os serviços.

Seu papel tem extrema importância nos dias atuais, já que a Amazônia possui uma posição estratégica de extrema relevância no cenário mundial, principalmente no que concerne à garantia da soberania e à preservação da enorme riqueza existente na região.

Em mais de cinquenta anos de atuação, a COMARA foi responsável pela construção e recuperação de mais de 150 pistas, além de viabilizar mais de 70 obras de reformas de instalações aeroportuárias e vias públicas.

Atualmente, nenhuma das obras aeroportuárias realizadas pela COMARA utiliza o PMF como solução para o revestimento asfáltico. De fato, algumas tentativas de utilização desta mistura já foram realizadas, sendo a mais relevante a obra de Jacareacanga-PA em 1999, onde se aplicou o pré-misturado a frio como revestimento para a pista de pouso e decolagem. Entretanto, com a utilização da pista, falhas no pavimento começaram a surgir, e este precisou ser reconstruído.

Durante a confecção deste trabalho, a COMARA realizava obras de infra-estrutura aeroportuária e edificações em 14 localidades, nos estados do Amapá, Amazonas, Pará, Acre e Rondônia.

1.2 Justificativa e relevância do trabalho

Existem grandes dificuldades logísticas enfrentadas durante o desenvolvimento das obras de infra-estrutura aeroportuária na região amazônica. As imensas distâncias entre os centros distribuidores de insumos e os locais das obras, aliada à falta de uma malha viária na região faz com que a imensa maioria dos materiais e equipamentos necessários para a execução das obras tenha que ser transportado por balsas através de rios navegáveis fazendo com que as distâncias entre os centros distribuidores de insumos e os locais das obras necessitem de até sessenta dias para serem vencidas.

Diante deste cenário, torna-se necessária a busca por alternativas que ajudem a transpor os obstáculos enfrentados pela COMARA no planejamento e execução de obras na região amazônica.

A utilização de PMF reduz as dificuldades encontradas pela COMARA, já que seu uso traz enormes vantagens tais como: redução de custos através da utilização de maquinário mais simples na usinagem, menor impacto ambiental, menor consumo de energia, maior facilidade de transporte de equipamentos, facilitação da logística empregada no desenvolvimento da obra, redução de prazos de execução e mobilização de insumos em locais de difícil acesso. Portanto, o trabalho traz um estudo que visa atestar a possível utilização do PMF nas obras de pista de pouso e decolagem da região amazônica.

Os PMFs começaram a ser utilizados no Brasil a partir de 1966, como camada de regularização e reforço na restauração da primeira pista da Rodovia Presidente Dutra. No fim da década de 60 e nos anos posteriores, foram largamente utilizados como camadas de regularização, reforço, base e binder nas principais rodovias do país, e em menor escala como revestimentos. A experiência com PMFs em aeroportos data da década de 70, onde foi utilizado com regularização, reforço e binder, sendo as experiências realizadas no Aeroporto Internacional de Brasília e no Aeroporto de Goiânia as mais relevantes.

1.3 Estruturação do Trabalho

A fim de atingir os objetivos de analisar a viabilidade do uso de PMFs como misturas asfálticas nas obras realizadas pela COMARA em pistas de pouso e decolagem de aeródromos desta região, o presente trabalho será estruturado da seguinte forma:

- Cap. 2 - Conceitos básicos sobre PMF;
- Cap. 3 - Abordagem logística sobre aeroportos da Amazônia;
- Cap. 4 - Análise de Viabilidade;
- Cap. 5 - Estudo de caso;
- Cap. 6 - Considerações finais.

O capítulo 2 apresenta um estudo sobre as misturas asfálticas do tipo pré-misturada a frio, através de pesquisa bibliográfica, mostrando as características e propriedades do material, suas aplicações mais utilizadas atualmente e os processos de obtenção da mistura incluindo os parâmetros de controle e qualidade.

Uma abordagem sobre a logística de transporte de insumos e máquinas para as obras na região amazônica, detalhando os problemas enfrentados pela COMARA será apresentada no capítulo 3 e uma análise da viabilidade de utilização do PMF, com foco no impacto dos custos oriundos de seu uso, da possível melhora da logística no desenvolvimento das obras e dos aspectos operacionais envolvidos será descrita no capítulo 4.

No capítulo 5 serão analisados casos de utilização de PMF, verificando as características finais das obras realizadas e o desempenho dos pavimentos ao longo de sua utilização, efetuando comparações entre o panorama atual da pista e o possível estado quando utilizado outras soluções de revestimento, identificando vantagens e desvantagens do uso de PMF.

Por fim, o capítulo 6 mostra os comentários e conclusões acerca da viabilidade do uso de PMF nas obras realizadas pela COMARA na região amazônica.

2 Conceitos básicos sobre PMF

2.1 Introdução

O pré-misturado a frio consiste em uma mistura asfáltica usinada em local apropriado, composta de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (filler) e um ligante asfáltico liquefeito (usualmente emulsão asfáltica catiônica convencional ou modificada por polímeros), espalhada e compactada à temperatura ambiente. Pode-se notar que esta definição deixa aberta a possibilidade de utilização de emulsões aniônicas e asfaltos diluídos. Entretanto, o possível uso de PMF pela COMARA nos aeródromos da região amazônica se restringe a emulsões catiônicas, pois seu uso é mais difundido e estudado no Brasil.

Atualmente, dentre os vários serviços que podem ser executados com emulsões asfálticas, o PMF é o mais empregado. Tais misturas podem ser utilizadas em camadas de revestimento, base, sub-base, regularização e reforço desde que a estrutura do pavimento esteja bem projetada. A facilidade com que se prepara a massa asfáltica, assim como sua fácil aplicação na pista, além de um baixo custo quando comparada com misturas a quente faz com que seu uso ganhe espaço em obras onde não há grandes recursos e mão-de-obra especializada disponível.

Para entender melhor o PMF, suas aplicações e vantagens, torna-se necessário conhecer os materiais que constituem a mistura. Como já citado, o PMF é composto de agregado graúdo e miúdo, material de enchimento e emulsão asfáltica.

2.2 Emulsão Asfáltica

Os asfaltos usados em pavimentação de pistas de pouso e decolagem são, em grande maioria, obtidos através da destilação do petróleo, recebendo o nome de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Entretanto, o CAP é um produto semi-sólido na temperatura ambiente, necessitando de aquecimento para ocorrer sua mistura com os agregados. No caso do PMF,

onde a mistura é espalhada a temperatura ambiente, é necessário liquefazer e emulsificar o CAP em água, obtendo as Emulsões Asfálticas (EAs).

As EAs são uma alternativa ao CAP, já que uma das maiores dificuldades encontradas por técnicos é a falta de trabalhabilidade a temperatura ambiente e os custos envolvidos no aquecimento dos componentes para a mistura com o CAP.

Pode-se definir emulsão como uma dispersão estável de partículas de dois ou mais líquidos imiscíveis. Assim, as EAs são uma dispersão de CAP com água. A emulsão asfáltica constitui um caso particular na qual uma das fases tem elevada viscosidade e os dois materiais não formam a emulsão por simples mistura dos componentes, sendo necessária a utilização de um produto auxiliar para mantê-la estável.

2.2.1 Processo de Emulsificação

Para se emulsificar um CAP, é necessário separá-lo em partículas muito pequenas, o que é feito nos chamados moinhos coloidais, e envolver tais partículas com emulsificante, de modo a impedir a ruptura da emulsão. O emulsificante é uma substância redutora das tensões superficiais, permitindo que os glóbulos de asfalto permaneçam em suspensão na água, evitando assim a aproximação entre as partículas e sua coalescência. O tempo em que as partículas permanecem separadas varia de semanas a meses, dependendo de como a emulsão é fabricada.

A EA é composta por 33 a 42% de água com CAP e emulsificante, de modo a ser misturada, transportada e armazenada em temperatura ambiente. O processo de quebra das partículas do CAP nos moinhos coloidais é realizado através de cisalhamento, aplicando-se energia térmica e mecânica na preparação da EA. Durante o processo, o CAP é aquecido a uma temperatura de aproximadamente 140°C e a fase aquosa a uma temperatura variando entre 50° e 60°C.

Os emulsificantes utilizados durante a preparação da emulsão têm papel fundamental nas propriedades relacionadas à estabilidade, resistência ao bombeamento, transporte e armazenamento do produto final. Tais características devem ser otimizadas, para que durante a aplicação da EA, tenha-se uma cura adequada, o ligante conserve sua capacidade adesiva, de resistência a água e de durabilidade (ABEDA, 2001).

Dependendo dos agentes emulsificantes, as EAs podem ter cargas elétricas negativas, positivas ou neutras, sendo classificadas em catiônicas, aniônicas ou não iônicas. Vale ressaltar que outros aditivos podem ser incorporados durante o processo de fabricação das emulsões, conferindo assim propriedades específicas a EA.

A separação das fases da emulsão é denominada ruptura. Como já explicado, o tempo necessário para que isto ocorra depende da natureza do emulsificante e confere propriedades importantes para a aplicação no campo, servindo também como critério de classificação.

2.2.2 Classificação

As EAs são classificadas de acordo com o tempo de ruptura, a carga e o teor de asfalto contido em sua composição.

O processo de ruptura ocorre quando a emulsão entra em contato com o agregado, dependendo do emulsificante utilizado, da reatividade dos agregados, do teor de umidade destes, da temperatura dos materiais e do ambiente externo.

Assim, quanto à carga, as emulsões podem ser classificadas em aniônicas e catiônicas, sendo a catiônica mais utilizada do que a aniônica no Brasil. As Emulsões Asfálticas Catiônicas (EACs) rompem mais devido a reação química com o agregado do que pela evaporação da água enquanto que nas Emulsões Asfálticas Aniônicas (EAAs) acontece o contrário. Este trabalho está restrito ao estudo de PMFs obtidos através de EACs.

As EACs podem ser classificadas ainda quanto à velocidade de ruptura em: Ruptura Rápida (RR), Ruptura Média (RM) e Ruptura Lenta (RL), e quanto a viscosidade em 1 (menos viscosa) e 2 (mais viscosa), sendo a viscosidade relacionada ao teor de asfalto contido em sua composição. Cabe ressaltar que as EACs de RL só se classificam em viscosidade tipo 1. Para o caso das emulsões catiônicas, usa-se ainda a letra C após o número correspondente a viscosidade, caracterizando-a como catiônica. Assim, temos os seguintes tipos de emulsões: RR-1C, RR-2C, RM-1C, RM-2C e RL-1C.

2.2.3 Cuidados em relação às EAs

No estudo das emulsões asfálticas, é importante não confundir os conceitos de ruptura (o CAP se separa da água e adere ao agregado) e cura (evaporação da água e do solvente).

O comportamento da EA depende de vários fatores intervenientes, tais como sua formulação, fabricação e aplicação. Apesar disto, o mais importante é o produto final que permanece no pavimento, o CAP e o emulsificante catiônico, que melhora a adesividade deste. Na prática, a os EAs oferecem uma gama tão grande de aplicações que, apesar de ser uma mistura de CAP, água e emulsificante, pode-se considerá-lo um produto totalmente novo, formulando-o para cada obra específica, de modo a se adaptar a cada necessidade, através de ajustes em seus componentes.

No que diz respeito ao processo de armazenamento da EA, deve-se atentar para o fato de que a cada mês é necessária uma agitação da substância. Em relação ao recebimento da EA, é importante a realização de ensaios, em especial o de viscosidade (viscosímetro Saybolt-Furol) e destilação (determinação do teor de CAP residual).

Podem-se citar ainda outros cuidados com relação à ruptura prematura e a contaminação das EAs de acordo com a ABEDA (2001):

- O armazenamento deve ser realizado com temperatura controlada para cada tipo de emulsão;
- Não aquecer as emulsões acima de 85°C e não deixar em temperatura ambiente abaixo de 10°C;
- Não utilizar ar comprimido para agitar as emulsões;
- Realizar aquecimento de forma homogênea nos tanques;
- Ao diluir, adicionar água e depois emulsão, nunca o contrário;
- Não estocar emulsões diluídas;
- Sempre completar as cargas dos caminhões-tanque, para evitar que a agitação altere as propriedades da emulsão;
- Recircular as emulsões, de preferência uma vez por semana, evitando recirculações e bombeamentos excessivos;
- Não armazenar em locais que possuam produtos remanescentes incompatíveis;
- Solicitar do fabricante informações técnicas relativas a preservação e segurança da emulsão, bem como a saúde e meio ambiente envolvidos nas operações.

2.2.4 Principais Vantagens das EAs

A ABEDA (2001), as EAs conferem vários benefícios e vantagens em sua utilização, dentre os quais se podem destacar:

- Economia de energia, uma vez que pode ser empregada sem necessidade de aquecimento;
- Possuem grande afinidade com todos os tipos de agregados, eliminado o uso de aditivos normalmente utilizados para melhorar a adesividade do CAP com agregados;
- Podem-se utilizar agregados úmidos, eliminado a necessidade de secagem dos mesmos;
- Permite a estocagem à temperatura ambiente, eliminado a necessidade de fontes de aquecimento;
- Eliminam os riscos de explosões, uma vez que não são utilizados solventes de petróleo em seu emprego;
- Evitam riscos de acidentes por queimadura;
- Preservam o meio ambiente, pois não eliminam vapores tóxicos e poluentes;

2.2.5 Aplicações

Devido a sua natureza, as EAs podem ser utilizadas em quase todas as camadas asfálticas existentes em um pavimento, tanto na construção de um novo como na sua recuperação ou rejuvenescimento. A Tabela 1 mostra as aplicações das EAs por tipo de serviços.

Cabe ressaltar que as emulsões asfálticas descritas na Tabela 1 podem ser modificadas por polímeros, dependendo do projeto e das especificações de serviço.

Tabela 1 - Aplicação das Emulsões por Tipo de Serviço

Serviços a Frio	Emulsões Asfálticas
Capa Selante / Banho Diluído	RR-1C; RR-2C; RL-1C
Pintura de Ligação	RR-1C; RR-2C; RM-1C; RM2C; RL-1C
Selagem de Fissuras	RR-1C; RL-1C
Tratamento Antipó	RR-1C; RR-2C; RL-1C
Macadame Betuminoso	RR-2C
Tratamentos Superficiais por Penetração	RR-1C; RR-2C
Areia-Asfalto	RL-1C
Pré-Misturados	RM-1C; RM-2C; RL-1C
Tapa Buracos	RR-1C; RM-1C; RM2C; RL-1C
Microrrevestimento Asfáltico	Emulsão Asfáltica com Polímero

2.2.6 Emulsões Asfálticas Modificadas por Polímeros

Na maioria das aplicações em rodovias, os asfaltos convencionais apresentam um bom comportamento, satisfazendo os requisitos necessários para o desempenho satisfatório das misturas asfálticas sobre cargas de tráfego e variações climáticas. Entretanto, existem condições de volume de tráfego e peso por eixo de veículos em rodovias e aeroportos, além de condições extremas de clima, em que se torna necessário o uso de modificadores de propriedades para melhorar o desempenho do ligante. Um dos principais modificadores utilizados atualmente são os polímeros.

Os polímeros são macromoléculas sintéticas, de estrutura simples, constituída de unidades estruturais repetidas ao longo de sua cadeia, chamadas de monômeros (MANO, 1999). O termo Polímero vem do grego (muitas partes), e se refere à união de várias moléculas pequenas formando, por reação química, moléculas maiores.

O comportamento do polímero sintético depende dos materiais utilizados, do tipo de reação empregado e da técnica de preparação. Os tipos mais comuns de reação empregados são:

- Poliadição, por exemplo, borracha estireno-butadieno (SBR) e etileno-acetato de vinila (EVA);
- Policondensação, por exemplo, resina epoxídica (ER) e politereftalato de etileno (PET);
- Modificação química de outro polímero, por exemplo, estireno-butadieno-estireno (SBS).

De acordo com seu comportamento frente às variações térmicas, os polímeros podem ser classificados como elastômeros e plastômeros.

Os elastômeros, quando aquecidos, se decompõem antes de amolecer, com propriedades elásticas. Produzem pavimentos mais elásticos, pois podem ser esticados e retornar a sua forma. Já os plastômeros garantem mais estabilidade e rigidez ao material asfáltico.

Os tipos mais comuns de elastômeros são:

- Natural – celulose, glicose, sacarose e ceras;
- SBS – material termoplástico, sendo o mais utilizado dos polímeros na modificação dos asfaltos, pois apresentam maior desempenho e comportamento nas misturas asfálticas. Aumentam a resistência dos pavimentos a deformações permanentes e a fadiga;
- SBR – materiais sintéticos, 25% de estireno e 75% de butadieno. É obtido principalmente por processo de polimerização em emulsão. Resiste bem a temperaturas elevadas e apresenta propriedades elásticas que lembram a borracha;
- Polipropileno atático (EPDM) – muito flexível e resistente ao calor e a agentes químicos.

Os principais tipos de plastômeros são:

- EVA – etileno-acetato de vinilo;
- EMA – etileno-acrilato de metilo;
- PE – polietileno;
- PP – polipropileno.
- Poliestireno

As emulsões asfálticas poliméricas podem ser classificadas nos seguintes tipos:

- Emulsão Asfáltica com polímero SBS – catiônica, contendo no mínimo 62% de asfalto modificado por polímero (AMP) com SBS a qual contém, no mínimo, 3% de polímero em peso de AMP e viscosidade SSF (25°C) entre 20 e 100 segundos. O polímero é incorporado diretamente no asfalto a altas temperaturas antes da emulsificação em condições tecnológicas específicas;
- Emulsão Asfáltica com Polímero SBR – Catiônica, contendo no mínimo 62% de AMP SBR com, no mínimo, 3% de polímero em peso de AMP e viscosidade SSF (25°C) entre 20 e 100 segundos. O polímero é introduzido in line, durante a emulsificação.

A Tabela 2 mostra as propriedades exigidas para os dois tipos de emulsões asfálticas poliméricas.

Tabela 2 - Propriedades EAs modificadas por polímeros

Característica	SBR		SBS	
	Exigência		Exigência	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Viscosidade Saybolt Furol, 25°C, s	20	100	20	100
Sedimentação, 5 dias, % em peso	-	5	-	5
Peneiramento, retido peneira 0,84mm, % em peso	-	0,10	-	0,10
Carga de partícula	positiva	-	positiva	-
Resíduo de emulsão por destilação, % em peso	62	-	62	-
Ensaio sobre resíduo				
- penetração, 100 g, 5 s, 25°C, 0,1mm	50	100	50	100
- ponto de amolecimento, °C	55	-	55	-
- viscosidade cinemática, 135°C, Cst	550	-	650	-
- recuperação elástica, 20cm, 25°C, %	60	-	75	-
- ductilidade, 25°C, 5cm/min, cm	60	-	60	-

Fonte: Adaptado com base na DNER-EM 396/99

É importante ressaltar que a quantidade de polímero a ser adicionada ao ligante é variável de acordo com as propriedades finais desejadas. Deve-se verificar a dispersão do polímero no CAP, de forma que a matriz polimérica fique fixada na estrutura do asfalto.

O uso de misturas asfálticas modificadas por polímeros pode reduzir os custos de manutenção e diminuir a frequência de reparos, aumentando a vida de serviço de pavimentos e trazendo benefícios em termos de custos em locais de difícil acesso ou onde o tráfego não pode ser interrompido.

Devido ao fato de o asfalto ser um material termoviscoelástico, suas características influenciam de forma direta o desempenho das misturas asfálticas. Neste sentido, as respostas da mistura geradas pelo pulso de carga originário pelo tráfego podem ser bastante melhoradas pela presença de polímeros no ligante.

2.3 Os Agregados

Os agregados são constituintes de fundamental importância para as misturas asfálticas, que constituem associações de ligantes asfálticos com agregados. Basta lembrar o fato de que mais de 70% da composição de uma mistura asfáltica é agregado. Assim, é de vital

importância que estas associações sejam feitas da melhor forma possível, sendo bem executadas e aplicadas corretamente, originando estruturas resistentes e duráveis.

De acordo com a norma NBR 9935 (ABNT, 2005), que determina a terminologia para os agregados, o termo é definido como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e de concreto.

A escolha do agregado deve ser feita de maneira criteriosa, devido a sua importância como constituinte do PMF. Para que se conheça o desempenho dos agregados, é importante considerar sua gênese para analisar suas propriedades e seu comportamento quando utilizado em uma mistura asfáltica. Para isso, utilizam-se ensaios de laboratório e experiência prática na tentativa de prever seu comportamento durante a vida útil de um pavimento.

Segundo Bernucci *et. al.* (2007), o desempenho de um agregado durante o serviço é dependente das propriedades geológicas da rocha de origem. Portanto, são importantes informações sobre esta rocha, sua composição mineralógica e química, sua granulação, seu grau de alteração, sua tendência a degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

2.3.1 Classificação

Os agregados podem ser classificados quanto a sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos. Quanto à natureza, podemos dividi-los em:

- Natural: originário de todas as fontes de ocorrência natural, podendo ser utilizados da forma como são encontrados na natureza ou britados. Os pedregulhos e seixos são exemplos deste tipo de agregado.
- Artificial: resíduos de processos industriais, tal como a escória de alto forno, ou fabricados para alto desempenho, como a argila calcinada.
- Reciclado: provenientes da reciclagem e reuso de materiais, vem ganhando importância devido à necessidade de redução de problemas ambientais.

Quanto ao tamanho, os agregados podem se classificar em:

- Graúdo: material com dimensões maiores que 2,0mm, é retido na peneira n° 10, como cascalhos e seixos;

- Miúdo: material com dimensões variando entre 0,075 e 2,0mm, é retido na peneira nº 200 mas passa na peneira nº 10, como as areias e o pó de pedra;

- Filler: é aquele onde pelo menos 65% das partículas é menor do que 0,075mm, como a cal hidratada e o cimento portland.

O tamanho do agregado tem grande influência na mistura asfáltica, uma vez que agregados de tamanho máximo muito pequeno atrapalham a trabalhabilidade da massa asfáltica, enquanto que agregados com tamanho máximo muito grande podem causar segregação na massa.

De acordo com Bernucci *et. al.* (2007), é importante ressaltar também que o material passante na peneira nº 200 é chamado de pó, de modo a diferenciá-lo da definição de filler. Há sérias limitações a quantidade de pó em uma mistura asfáltica. O aumento da quantidade de pó reduz o número de vazios do esqueleto mineral e aumenta a trabalhabilidade da mistura asfáltica. Acima de certo valor, o excesso prejudica a trabalhabilidade, pois diminui os contatos entre as partículas grossas, alterando também a capacidade de compactação da mistura. Se a maior parte do pó for originário de partículas maiores que 0,040mm, estas vão atuar preenchendo os vazios do esqueleto mineral. Entretanto, se as partículas forem menores do que 0,020mm, estas vão atuar no ligante asfáltico, unindo-se a este como um filme ligante e envolvendo as partículas maiores de agregado.

Por fim, os agregados podem ser classificados quanto a sua distribuição granulométrica. A granulometria influi de maneira decisiva no comportamento do PMF, pois altera propriedades tais como rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida entre outras (BERNUCCI *et. al.*, 2007).

Para determinar a distribuição granulométrica dos agregados, usualmente realiza-se ensaio de peneiramento, onde uma amostra seca é fracionada através de uma série de peneiras de malhas cada vez menores. Com cada massa de partículas retidas nas peneiras, calcula-se a percentagem em massa em cada malha. Assim, subdividem-se as graduações em classes para auxiliar na distinção de tipos de misturas asfálticas. As mais importantes graduações, de acordo com Bernucci *et. al.* (2007) são:

- Densa ou bem graduada: apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima a densidade máxima;

- Aberta: possui distribuição contínua, mas tem insuficiência de materiais finos que preenchem os vazios entre as partículas maiores, resultando em maior volume de vazios;

- Uniforme: possui a maioria de suas partículas em uma faixa bastante estreita;
- Descontínua: possui pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários, sendo muito sensível a segregação.

2.3.2 Características

Para a obtenção de misturas asfálticas satisfatórias, em especial para PMF, os agregados devem possuir algumas características importantes. As principais características dos agregados de acordo com Santana (1992) são as que se seguem:

- Limpeza: é condição essencial, principalmente no caso do PMF, onde não passam no secador;
- Resistência Mecânica: o agregado graúdo deve resistir ao choque e ao desgaste por atrito entre as partículas. O ensaio mais realizado no Brasil e no mundo para determinação da resistência mecânica é o Ensaio de Abrasão Los Angeles;
- Forma e Textura: o agregado graúdo deve possuir boa forma, sendo livre de partículas alongadas e lamelares. Os agregados de arestas vivas e textura rugosa tendem a possuir maior adesividade e atrito interno do que aqueles arredondados e lisos;
- Durabilidade: o agregado graúdo deve possuir durabilidade mecânica e química;
- Contaminação com finos plásticos: o agregado miúdo deve ser livre de finos plásticos, determinados pelo ensaio de equivalente areia;
- Porosidade: excesso de porosidade faz absorver água e asfalto em quantidades exageradas;
- Adesividade aos produtos asfálticos: uma das mais importantes características, sendo dependente do par ligante/agregado, primordial para uma mistura asfáltica, principalmente naquelas com grande porcentagem de vazios.

A adesividade é uma característica do par ligante asfalto/agregado, podendo ser analisada sobre dois ângulos.

A adesividade ativa ocorre quando o ligante cobre o agregado, sendo imprescindível a molhagem deste. Ela se manifesta devido a interações químicas entre o CAP e o agregado e depende da natureza de cada um deles. Um agregado liso e sem poros facilita a ação da adesividade ativa, especialmente em misturas a quente. Entretanto, nas misturas a frio, há

presença de água, não havendo molhagem do ligante e, portanto, não ocorrendo adesividade ativa. Este problema é solucionado com a utilização de emulsificantes catiônicos, pois estes são excelentes dopes, ou seja, melhoram a adesividade.

Já a adesividade passiva é a resistência apresentada ao deslocamento pela película de CAP. Assim, características tais como textura rugosa e porosidade do agregado, alta viscosidade do CAP, que atrapalham a adesividade ativa, favorecem a adesividade passiva. Por esse motivo é indispensável à presença de dopes para que se obtenha uma mistura adequada (SANTANA, 1992).

A adesividade tem papel fundamental no funcionamento das misturas asfálticas, principalmente naquelas com grande porcentagem de vazios, onde há intensa percolação de água.

2.4 Misturas Asfálticas

2.4.1 Classificação

Há várias formas de classificar as misturas asfálticas de acordo com organismos internacionais. A forma mais comum e utilizada é a que separa as misturas em duas classificações: a quente e a frio.

As misturas a frio, objeto de estudo deste trabalho, mais especificamente os PMFs, são confeccionadas com asfaltos liquefeitos, as emulsões asfálticas catiônicas (EACs). Sua principal característica é o fato de serem espalhadas e compactadas à temperatura ambiente, diferentemente das misturas a quente.

Outra classificação muito utilizada e descrita por Santana (1992) para as misturas asfálticas é aquela que considera o teor de vazios da mistura. Estas são classificadas como:

- Aberta;
- Semi-densa;
- Densa.

Os valores que distinguem as três categorias divergem bastante pelo mundo. A Tabela 3 mostra os valores adotados para uma mistura a frio e para uma mistura a quente segundo o Santana (1992).

Tabela 3 - Classificação de acordo como teor de vazios

Mistura	A frio	A Quente
Densa	$V_v < 15\%$	$V_v < 8\%$
Semi-Densa	$V_v : 15-22\%$	$V_v : 8-12\%$
Aberta	$V_v > 22\%$	$V_v > 12\%$

As misturas a frio com pouca argamassa e alto teor de vazios ($V_v > 22\%$) são denominadas pré-misturados a frio abertas (PMFAs), tendo seu comportamento orientado pelo atrito entre as partículas e por uma pequena parcela de película ligante.

Com um pequeno acréscimo de material fino, passa-se a ter uma quantidade maior de mastique, diminuindo o teor de vazios ($15\% < V_v < 22\%$), obtendo-se assim o pré-misturado a frio semi-denso (PMFsD). Esta mistura ainda apresenta o comportamento mecânico bastante relacionado ao atrito entre as partículas, porém possui argamassa suficiente para tender a ficar crítico o teor de ligante, sendo necessário assim um método de dosagem, como por exemplo, o método Marshall.

As misturas a frio com teor de vazios limitados a $V_v < 15\%$ são denominadas pré-misturados a frio denso (PMFD), tendo seu comportamento orientado pelo mastique, sendo necessário um método de dosagem do tipo Marshall por exemplo.

O significado de aberta na classificação nada tem a ver com a textura e sim com a compacidade.

É interessante notar a diferença de valores apresentados nas misturas a quente e a frio. Santana (1992) descreve dois fatos relevantes para explicar os valores mais nas misturas a frio:

- As misturas a frio necessitam de mais vazios do que as misturas a quente, pois existe necessidade de evaporação de água com ou sem solvente (emulsões asfálticas);
- Na fase de consolidação pelo tráfego, há uma maior diminuição do volume de vazios nas misturas a frio, e os valores descritos se referem aos valores obtidos em laboratório.

Há ainda a classificação que considera a estrutura interna da mistura asfáltica. Denomina-se misturas com esqueleto mineral aquelas em que as partículas de agregados se tocam, deixando vazios no agregado, e sem esqueleto mineral dispersões de filler no cimento

asfáltico, sem vazios, onde as partículas de filler não se tocam. Esta última é também chamada de mastique.

O esqueleto mineral pode ser composto de agregado graúdo e por um agregado miúdo (acompanhado ou não de filler). Pode-se acrescentar agregado graúdo e miúdo a um mastique asfáltico de modo que suas partículas não se toquem como no caso do chamado gussasphalt alemão, usado para tráfego intenso de veículos.

Nota-se que no caso da presença de filler, o ligante asfáltico na mistura passa a ser o mastique, apresentando comportamento reológico diferente do asfalto original.

Assim, pode-se resumir a classificação das misturas asfálticas da seguinte forma:

- Quanto à temperatura de espalhamento e compactação:
 - o a quente;
 - o a frio;
- Quanto à porcentagem de vazios (%V_v):
 - o Aberta;
 - o Semi-densa;
 - o Densa;
- Quanto à estrutura interna:
 - o Com esqueleto mineral;
 - o Sem esqueleto mineral.

2.4.2 Parâmetros Físicos Intervenientes

Massa específica real (γ_R): é a relação entre a massa de um dado volume de um material pela massa de igual volume de água, a mesma temperatura. Normalmente, para a determinação de γ_R usa-se o picnômetro.

$$\gamma_R = \frac{(z-x)}{(y-x).(w-z)} \quad (1)$$

onde:

γ_R = massa específica real da mistura asfáltica;

x = massa do picnômetro vazio;

massa do picnômetro com água;
 massa do picnômetro com amostra;
 massa do picnômetro com amostra e água.

Pode-se inferir então que a massa específica real da amostra é a relação entre a massa de amostra pelo volume da amostra sem os vazios.

Os componentes de uma mistura asfáltica podem ser esquematizados de acordo com a Figura 1.



Figura 1 - Constituintes de uma mistura asfáltica

Onde:

volume de vazios;
 volume de material asfáltico;
 volume de filler;
 volume de agregado fino;
 volume de agregado graúdo;
 volume total;
 massa de material asfáltico;
 massa de filler;
 massa de agregado fino;
 massa de agregado graúdo;
 massa total;

Massa específica máxima teórica da mistura (γ_t): é a massa específica da mistura, considerada sem vazios. Pode ser dada pela fórmula:

$$\gamma_t = \frac{m_t}{\frac{m_{ma}}{\gamma_{ma}} + \frac{m_f}{\gamma_f} + \frac{m_{agf}}{\gamma_{agf}} + \frac{m_{agg}}{\gamma_{agg}}} \quad (2)$$

Pode-se ainda escrever γ_t de forma mais simplificada:

$$\gamma_t = \frac{m_t}{V_t - V_v} \quad (3)$$

Massa específica aparente da mistura (γ_{ap}): é a relação entre a massa da mistura e o volume total ocupado pela mesma, nas condições de compactação consideradas.

$$\gamma_{ap} = \frac{m_t}{V_t} \quad (4)$$

A forma como se calcula γ_{ap} varia de acordo com as seguintes peculiaridades:

a) Corpo de prova impermeável: calcula-se o volume através da balança hidrostática.

- Prepara-se o corpo de prova em um molde (Marshall);
- Pesa-se o corpo de prova ao ar e obtém-se a massa total m_t ;
- Pesa-se o corpo de prova imerso na água com o auxílio de um arame de massa

conhecida m_a ;

- Obtém-se a massa do corpo de prova imerso m_{im} ;

A massa do corpo de prova imerso na água será dada por:

$$m_i = m_{im} - m_a \quad (5)$$

Por fim, calcula-se γ_{ap} através da expressão:

$$\gamma_{ap} = \frac{m_t}{m_t - m_i} \quad (6)$$

b) Corpo de prova com textura aberta: deve-se recobrir o corpo de prova com parafina, para que este possa ser pesado na balança hidrostática. A massa específica aparente da mistura nesse caso será dada por:

$$\gamma_{ap} = \frac{m_t}{m_p - m_i - \frac{(m_p - m_t)}{\gamma_p}} \quad (7)$$

Onde:

m_t : massa do corpo de prova ao ar;

m_p : massa do corpo de prova parafinado ao ar;

m_i : massa do corpo de prova parafinado na água;

γ_p : massa específica da parafina.

c) Corpo de prova com superfície lisa e dimensões conhecidas: apenas aplica-se no caso da superfície ser lisa e as dimensões conhecidas ou determináveis.

Neste caso, a massa específica aparente será:

$$\gamma_{ap} = \frac{m_t}{V_t} \quad (8)$$

Onde:

m_t : massa do corpo de prova ao ar;

V_t : volume do corpo de prova, calculado a partir de suas dimensões.

Porcentagem de asfalto em volume (% V_{ma}): é a razão expressa entre o volume total de material asfáltico e o volume total da mistura. Pode ser expressa como:

$$\% V_{ma} = \frac{V_{ma}}{V_t} \cdot 100 \quad (9)$$

A porcentagem de asfalto em volume pode ser calculada ainda conhecendo-se a porcentagem em massa do ligante (% m_{ma}), a massa específica aparente (γ_{ap}) e a massa específica da mistura asfáltica (γ_{ma}).

$$\% V_{ma} = \frac{\% m_{ma} \cdot \gamma_{ap}}{\gamma_{ma}} \quad (10)$$

Porcentagem de vazios da mistura (% V_v): é a relação entre o volume de vazios existente na mistura e o volume total.

$$\% V_v = \frac{V_v}{V_t} \cdot 100 \quad (11)$$

A porcentagem de vazios pode ser ainda calculada através da seguinte fórmula:

$$\% V_v = \frac{\gamma_t - \gamma_{ap}}{\gamma_t} \cdot 100 \quad (12)$$

Assim, determinando-se a massa específica aparente e real da mistura pode-se calcular a porcentagem de vazios.

Porcentagem de vazios do agregado mineral (% VAM): é a soma da porcentagem de vazios mais a porcentagem de asfalto em volume.

$$\% VAM = \% V_v + \% V_{ma} \quad (13)$$

$$\% VAM = \frac{V_v + V_{ma}}{V_t} \cdot 100 \quad (14)$$

Relação asfalto/vazios (% RBV): é a relação entre o volume de material asfáltico e o volume total descontado aquele ocupado pelos agregados.

$$\% RBV = \frac{V_{ma}}{V_v + V_{ma}} \cdot 100 \quad (15)$$

2.4.3 Comportamento Reológico e Hidráulico

Conforme Santana (1992), as misturas asfálticas ficam, de forma simplificada, sujeitas a dois tipos de solicitações devido ao tráfego:

a) Solicitações de cargas lentas em temperaturas elevadas, que tendem a provocar fluência plástica ou até mesmo ruptura por cisalhamento.

A mistura asfáltica deve resistir a essa fluência plástica possuindo certa estabilidade que é relacionada à sua resistência ao cisalhamento. A resistência ao fluxo plástico é determinada através de ensaios teóricos, sendo o Ensaio Marshall o mais difundido no Brasil. Neste método, determina-se a força necessária para o rompimento de um corpo de prova padrão (chamada de estabilidade Marshall) e a diminuição sofrida por este corpo (fluência Marshall).

Quanto maior a coesão da mistura, dada pelo ligante asfáltico, maior essa resistência. Assim, é vantajoso o uso de CAPs mais viscosos e de maior quantidade de filler ativo. O atrito interno também aumenta a resistência ao cisalhamento, devendo-se assim serem utilizados preferivelmente agregados britados com maior resistência ao desgaste (baixo Los Angeles).

b) Solicitações de cargas rápidas em temperaturas baixas, que tendem a provocar deformações elásticas reversíveis.

As deformações plásticas originadas acarretam em deformações e tensões de tração e flexão na face inferior da camada de mistura asfáltica. Após um dado número de repetições de carga, tais deformações e tensões originam trincamento (fadiga a flexão).

Na fluência plástica, a característica mais relevante da mistura asfáltica a se considerar é a estabilidade, onde esta passa por um máximo para um determinado teor ótimo de CAP. Nota-se que a estabilidade é mais crítica em revestimentos mais espessos do que em revestimentos delgados.

Já na fadiga a flexão, as principais características a se considerar são: o módulo de rigidez (MR), o coeficiente de Poisson (ν) e a curva de fadiga correspondente ao regime em que a mistura trabalhará.

É importante salientar as seguintes informações a respeito do comportamento das misturas asfálticas na fadiga a flexão:

- Com o passar dos anos os CAPs vão envelhecendo e com isso endurecendo, aumentando assim os MRs das misturas correspondentes, até se tornarem frágeis e quebradiços, trincando assim os respectivos pavimentos. É importante salientar que os ensaios de fadiga realizados no laboratório acontecem com poucos dias, não havendo o aumento do MR, tornando assim a curva de fadiga menos representativa;

- A vida de fadiga de uma mistura depende de sua configuração no pavimento (espessura e MR), não se podendo assim dizer se é vantajoso aumentar ou diminuir um desses dois parâmetros.

2.5 Misturas asfálticas a frio

Os pré-misturados a frio consistem em uma mistura usinada de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, misturado com emulsão asfáltica (geralmente catiônica) modificada ou não por polímeros a temperatura ambiente. Diferentemente das misturas a quente, onde a viscosidade do ligante necessária para processar a mistura é obtida com aquecimento, acarretando em maiores gastos e possíveis danos ao ambiente, nos PMFs, obtêm-se a viscosidade necessária à temperatura ambiente, através da utilização das EAs.

A classificação dos PMFs são as mesmas já detalhadas para as misturas asfálticas. Entretanto, alguns aspectos inerentes às misturas a frio devem ser considerados.

2.5.1 Aspectos funcional, estrutural e hidráulico dos PMFs

Para a melhor compreensão dos aspectos relacionados ao PMF, é interessante descrever aquilo que se pode considerar a melhor mistura asfáltica que se possa produzir, conhecida no Brasil como Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

O CBUQ como melhor mistura, deve apresentar as seguintes características, supondo-se um perfeito sistema de drenagem e um eficiente sistema de conservação, além de um bom projeto e boa execução (SANTANA, 1992):

- Máxima impermeabilidade ao ar e a água, sem exudação;
- Estabilidade e resistência à fadiga satisfatória para qualquer valor do número N no prazo máximo de 30 anos;
- Características superficiais de conforto e segurança no caso de revestimentos;

A estabilidade de tal mistura é função do atrito interno, fornecido pelo agregado graúdo, e principalmente da coesão da argamassa, que é muito sensível aos teores de CAP e filler. A fadiga clássica é comandada pelo comportamento do mastique (filler ativo disperso no CAP), que após solicitações repetidas acaba trincando, o que é acelerado pelo envelhecimento do concreto asfáltico em serviço.

Nas misturas a frio, o comportamento é bem diferente do CBUQ. Os PMFs com pouquíssima argamassa, praticamente sem filler e com alto teor de vazios, chamados de

PMFAs, possuem características completamente distintas do concreto betuminoso usinado a quente. Sua estabilidade se dá devido ao atrito entre as partículas, com uma pequena ajuda da coesão desenvolvida pela película de CAP que as envolve. Para este tipo de mistura, um ensaio do tipo Marshall não faz sentido, já que este não leva em consideração a pressão de confinamento, que é muito importante para a estabilidade.

Para os PMFAs não se aplica o modelo clássico de fadiga, pois praticamente não existe argamassa, e a ruína se dá principalmente por desagregação provocada pela abrasão do agregado graúdo. Devido ao volume de vazios elevado, o CAP endurece rapidamente, baixando a penetração, aumentando a viscosidade e o módulo de rigidez MR, sem, entretanto provocar trincas de fadiga, e apenas em climas muito frios provocando poucas trincas de retração. Por fim, a exudação pode ocorrer somente devido à películas de CAP muito espessas, e nunca decorrente da migração deste por falta de vazios, como ocorre no CBUQ.

Aumentando-se a quantidade de argamassa e filler no PMFA e diminuindo um pouco o teor de vazios, obtêm-se os PMFsD (pré-misturados a frio semi-densos), cujo comportamento a fadiga é igual ao PMFA, mas o teor de ligante é crítico para a estabilidade, sendo necessário um método de dosagem.

Os PMFs com quantidade significativa de argamassa com filler e limitado teor de vazios (PMFDs) já apresentam comportamento próximo do CBUQ no que se refere à fadiga e estabilidade, sendo necessário um método de dosagem.

Resumidamente, Santana (1992) sugere para os diferentes tipos de PMFs:

- PMFA

- o Para $N \leq 2 \times 10^6$, usar em revestimentos, dosando em função da superfície específica, não sendo necessária a verificação da fadiga e da estabilidade;

- o Para $N \leq 10^7$, usar em binders e bases.

- PMFsD – segue-se as mesmas restrições dos PMFs abertos, fazendo-se a dosagem por algum método consagrado;

- PMFD – para $N \leq 10^7$, usar somente em revestimentos, efetuando a dosagem e levando em consideração a fadiga.

Vários trabalhos e estudos ao longo dos anos foram realizados com PMFs na tentativa de se entender melhor o seu comportamento ao longo de sua vida útil, buscando determinar a adequada composição granulométrica, a quantidade ideal de emulsão betuminosa, a quantidade de água para molhagem dos agregados, assim como os métodos de execução e controle de qualidade da mistura.

Uma das mais importantes pesquisas foi iniciada em 1976, pela Oregon State University (OSU). Foram levantados segmentos de rodovias com revestimento em PMFs mais abertos, repetindo-se tal levantamento cinco (1981) e dez anos depois (1986). Os principais fatores avaliados foram: módulo de rigidez, teor de asfalto residual, penetração e viscosidade no CAP recuperado, parâmetros físicos e granulometria dos agregados.

Santana (1992) relata as principais conclusões encontradas pela OSU:

- Os seguimentos levantados apresentaram excelente comportamento, com mais de 50% apresentando avaliação global muito boa e apenas 11% apresentando avaliação regular;
- A grande maioria das poucas trincas encontradas correspondem a trincas de retração, devido ao clima frio da região. É quase inexistente o aparecimento de trincas de fadiga;
- Há um forte crescimento do MR com o tempo, havendo trechos variando de 5.100 kgf/cm^2 (1976) a 69.790 kgf/cm^2 (1986);
- Detectou-se que a camada de revestimento proporcionou elevada estabilidade (resistência ao fluxo plástico) e adequada proteção a camadas subjacentes, traduzidas pelas pequenas espessuras de trilha de roda;
- Apresentaram comportamento igual ou superior as misturas a quente;
- O principal defeito é a tendência a pequenas desagregações na superfície, o que pode ser resolvido através de tratamentos superficiais;
- A execução das camadas deve ser feita em tempo quente, para garantir a cura. É necessária a execução de uma capa selante para proteger a base granular da umidade e sua superfície de desagregações.

Segundo Vogt (1980 apud SANTANA, 1992), os principais problemas encontrados em obras rodoviárias onde o PMF foi utilizado foram:

- Poluição do agregado e excesso de filler;
- Ruptura seletiva, onde a emulsão deixa de envolver a brita ou a areia;
- Desagregação provocada por um módulo de riqueza k muito baixo ou por uma compactação deficiente e camada subjacente instável.

Tuchumantel (1990 apud SANTANA, 1992) apresenta em seu estudo a grande importância do teor de umidade na compactação dos PMFs densos e semi-densos, onde o teor ótimo é crítico. Mostra-se também a evolução do volume de vazios nos primeiros meses de um revestimento em PMFD. A Tabela 4 mostra esta evolução.

Tabela 4 - Evolução do volume de vazios

Trechos	%V _v					
	Projeto	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió
I	15,5	11,8	8,9	-	-	6,9
II	15,5	9,1	-	-	7,5	-
III	15,5	12,8	-	-	10,1	8,7
IV	15,5	-	12,1	-	9,4	7
Média	15,5	11,2	10,5	-	9	7,5

Fonte: Santana (1992)

O tempo de cura para compactação é fator primordial para as misturas frias, variando em função da absorção do agregado, temperatura e umidade do ar. Assim, muitas experiências falhas com PMF devem-se ao fato do desconhecimento de tais fatores.

Serfass (2002 apud ROSO, 2007) realizou uma experiência onde duas misturas betuminosas, uma a frio e outra a quente, com agregados oriundos do mesmo lote, resíduo asfáltico de mesma magnitude e igual volume de vazios.

Ao medir o tamanho dos glóbulos de ar (vazios), estes se apresentaram menores na mistura a frio. O autor atribui este fato ao modo como a película de ligante é formada, e ao fato de a viscosidade do betume ser maior a temperatura ambiente.

Vários fatores influenciam as características das misturas a frio. Entretanto, independentemente destes fatores, algumas considerações devem ser seguidas (SANTANA, 1992):

- Dosar PMFs densos e semi-densos pelo método Marshall, e PMFA utilizar o método da área específica;
- Usar emulsões asfálticas catiônicas;
- No caso das emulsões catiônicas de ruptura média, liberar o tráfego quatro horas após a compactação, averiguando a estabilidade visualmente. Para a emulsão de ruptura lenta, liberar o tráfego entre 0 e 24 horas após a compactação, analisando a possibilidade de utilizar uma pequena cobertura com areia ou pó de pedra, para evitar o arrancamento das partículas pelo tráfego;
- Examinar cuidadosamente o projeto de drenagem sub-superficial, dando condições de escoamento a água, em hipótese nenhuma deixando água parada em camada de PMF;
- Em revestimentos de PMFA/sD, projetar sempre uma capa selante.

2.5.2 Dosagem – Metodologia Marshall

Há diversas metodologias para a dosagem de PMFs utilizadas ao redor do mundo, como por exemplo: Chevron, US - Forestal Service, FHWA – Federal Highway Administration entre outras. No Brasil, usa-se a metodologia Marshall para a dosagem dos pré-misturados a frio, conforme a norma técnica DNER-ME 107/94.

Antes de detalhar as etapas da metodologia Marshall, é interessante apresentar um fluxograma do projeto da mistura a frio. A Figura 2 mostra tal fluxograma.

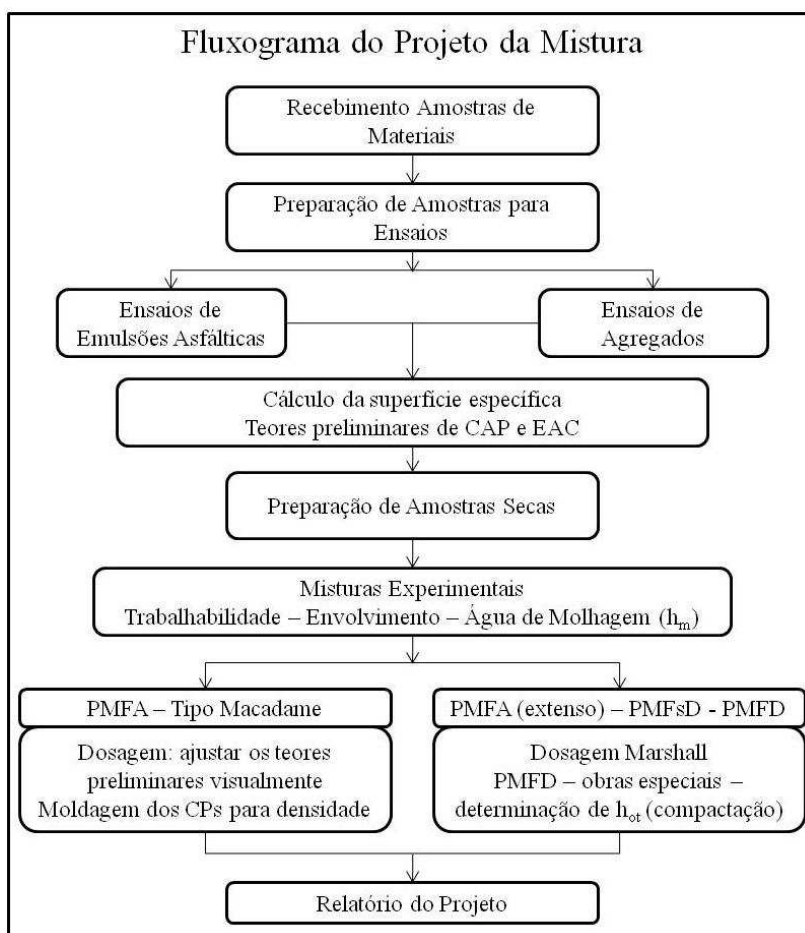


Figura 2 - Fluxograma do projeto de um PMF

2.5.2.1 Etapas

2.5.2.1.1 Preparação das Amostras

Nesta etapa, o laboratório responsável pela dosagem prepara as amostras de EAC e dos agregados para os ensaios previstos. É importante que o recebimento dos materiais venha acompanhado de detalhes sobre o tipo de obra e de camada para o qual o ensaio de destina, o tipo de PMF, a preferência de faixas granulométricas, os tipos de ensaios para a EAC e para os agregados e quaisquer outros detalhes julgados pertinentes.

2.5.2.1.2 Ensaio de EACs

Devem-se realizar no mínimo os ensaios para obtenção da viscosidade e teor de CAP residual.

2.5.2.1.3 Ensaios de Agregados

Deve-se fazer a análise granulométrica dos agregados de acordo com a faixa escolhida, que é normalmente realizado a seco. Pode ser importante, dependendo da obra, realizar o ensaio de granulometria lavado.

Caso não especificado para o laboratório os ensaios de agregados, deve-se fazer no mínimo: massa específica real, absorção, adesividade e Los Angeles.

2.5.2.1.4 Cálculo dos Teores Preliminares de CAP e EAC

Para o cálculo dos teores preliminares de CAP e EAC utiliza-se a metodologia baseada no cálculo da superfície específica dos agregados a partir da proporção dos diversos tamanhos de partícula devidamente ponderada. Para tal, utiliza-se a fórmula de Vogt, adaptada para as peneiras utilizadas no Brasil.

Calcula-se o teor de asfalto residual (p) em relação à massa total dos agregados utilizando a equação (16), onde k representa o módulo de riqueza.

$$p = k \times \Sigma^{0,2} \quad (16)$$

Para PMF denso, Santana (1992) sugere valores de k entre 3,2 e 4,5. Obtém-se o teor de asfalto p' e de emulsão asfáltica p'_{EA} sobre a mistura asfáltica total através das equações (17) e (18), onde t é o teor percentual em massa de asfalto na emulsão asfáltica.

$$p' = \frac{100 \times p}{100 + p} \quad (17)$$

$$p'_{EA} = \frac{100 \times p'}{t} \quad (18)$$

2.5.2.1.5 Moldagem e ruptura dos corpos de prova

Tendo como parâmetro o valor de p'_{EA} , faz-se misturas experimentais, variando-se o teor de emulsão asfáltica em $\pm 2\%$, procurando-se determinar de forma visual a trabalhabilidade e o envolvimento, calculando-se o teor de molhagem h_m e objetivando encontrar a mistura experimental com uma cobertura satisfatória e boa trabalhabilidade.

Prepara-se 5 misturas, duas com teor de CAP residual acima (+1% e +2%) e duas abaixo (-1% e -2%) do valor encontrado. Para cada uma das 5 misturas, molda-se 3 corpos de prova Marshall, tirando-se a média encontrada para cada corpo nos seguintes parâmetros:

- Massa específica aparente - γ_{ap} ;
- Porcentagem de vazios - % V_v ;
- Porcentagem em volume de asfalto - % V_{ma} ;
- Porcentagem de vazios no agregado mineral - % VAM;
- Relação betume vazios - % RBV.

Após a realização de tais medidas, os corpos de prova são submersos em banho-maria a 60°C por 30 a 40 min. Retiram-se cada corpo de prova colocando-se imediatamente dentro do molde de compressão. Determina-se então, por meio da prensa Marshall, os seguintes parâmetros mecânicos:

- Estabilidade Marshall - carga máxima com a qual o corpo de prova resiste antes da ruptura, definida com um deslocamento ou quebra do agregado de modo a causar diminuição na carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante de 0,8mm/segundo;
- Fluência Marshall – deslocamento na vertical apresentado pelo corpo de prova correspondente à aplicação da carga máxima.

Com todos os parâmetros volumétricos e mecânicos determinados, são plotadas 6 curvas em função do teor de EAC (Massa específica aparente, Volume de vazios, Relação Betume vazios, Vazios do agregado mineral, Massa específica máxima teórica e Estabilidade X Teor de EAC) que podem ser utilizadas na determinação dos teores de projeto.

Para a determinação do teor ótimo de EAC, Santana (1992) sugere a determinação do teor de projeto final de acordo com o teor que obtiver a maior massa específica aparente do corpo de prova.

2.5.3 Construção de camadas

As etapas da construção de um PMF são bem conhecidas no Brasil. O fluxograma apresentado na Figura 3 apresenta a ordem das instruções para a confecção de uma camada de pré-misturado a frio de forma bem sucedida.

De acordo com o projeto realizado para a mistura asfáltica, a dosagem é transmitida para a obra, acompanhada das especificações gerais e particulares originárias do projeto de

pavimentação. Assim, pode-se proceder aos serviços de construção do pavimento, que podem ser subdivididos em quatro categorias: mistura, transporte, espalhamento e compactação.

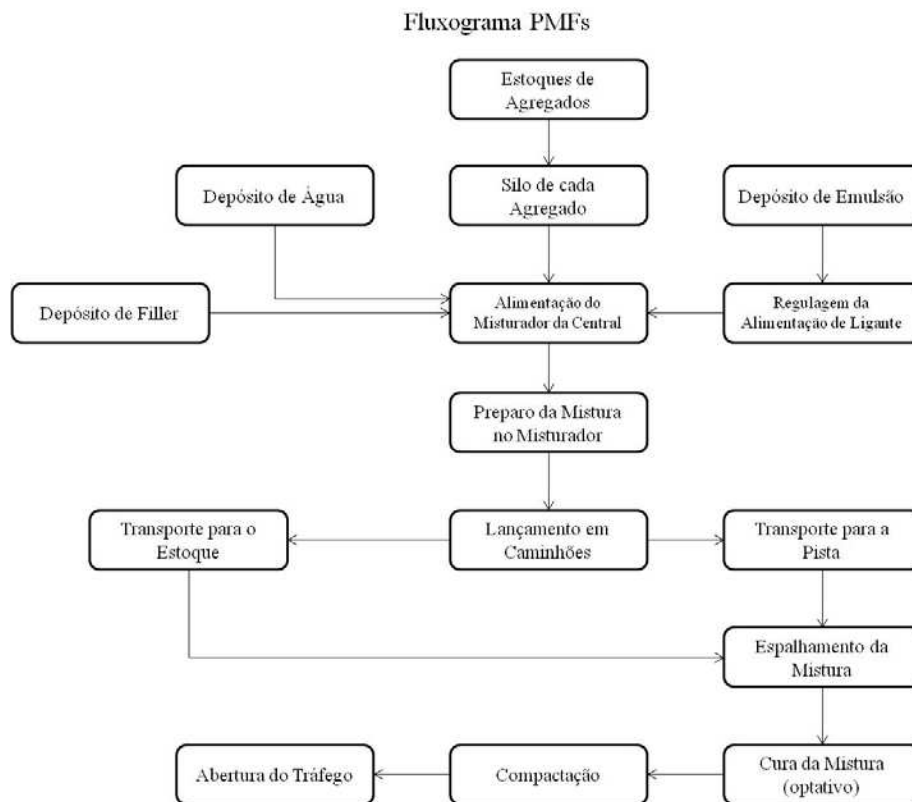


Figura 3 - Processo de construção de uma camada de PMF

2.5.3.1 Mistura

A mistura é feita em usinas, que podem ser fixas ou móveis. A Figura 4 mostra o esquema de uma central a frio, com 2 silos para entrada de materiais. Entretanto, é aconselhável a utilização de usina com 3 silos, já que é bastante comum a utilização de 3 tipos de materiais (por exemplo, brita, pedrisco e areia).

É interessante notar que a Figura 4 não mostra detalhes do depósito de filler e do sistema de aquecimento da emulsão (que é indispensável em dias frios), que devem dispor de dispositivos de regulagem do filler e de homogeneização e controle de temperatura respectivamente.

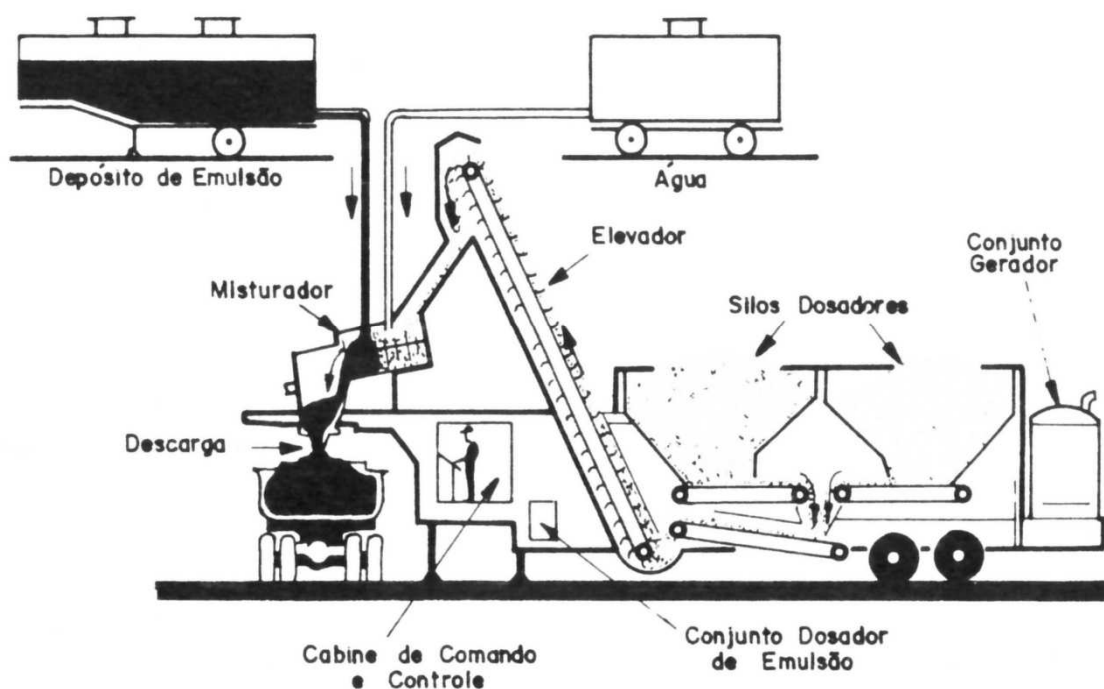


Figura 4 - Esquema de uma central a frio (SANTANA, 1992).

Os silos devem possuir dispositivo que permita a regulação do fluxo de agregados, e o fluxo da emulsão deve ser comandado por uma bomba que garanta pressão constante na saída. O dispositivo misturador considerado ideal é do tipo “pugmill”, com 2 eixos paralelos a direção do avanço dos materiais, com palhetas que promovam a mistura e o avanço destes.

Com relação à saída do misturador, que é descarregada no caminhão, deve-se colocá-la a 3 metros de altura em relação ao solo. A Figura 5 mostra a saída do misturador descarregando no caminhão.

Já as usinas móveis trazem grande vantagem econômica. Entretanto, por possuírem mistura e espalhamento em uma só operação, há a desvantagem de não se possuir um controle intermediário entre as etapas, fato que não permite correções a fim de minimizar problemas. A Figura 6 mostra o esquema de uma usina móvel.

É importante verificar durante a operação de uma usina (SANTANA, 1992):

- A umidade dos agregados e o teor da água de molhagem;
- O teor de emulsão;
- A qualidade do processo de mistura;
- A segregação.

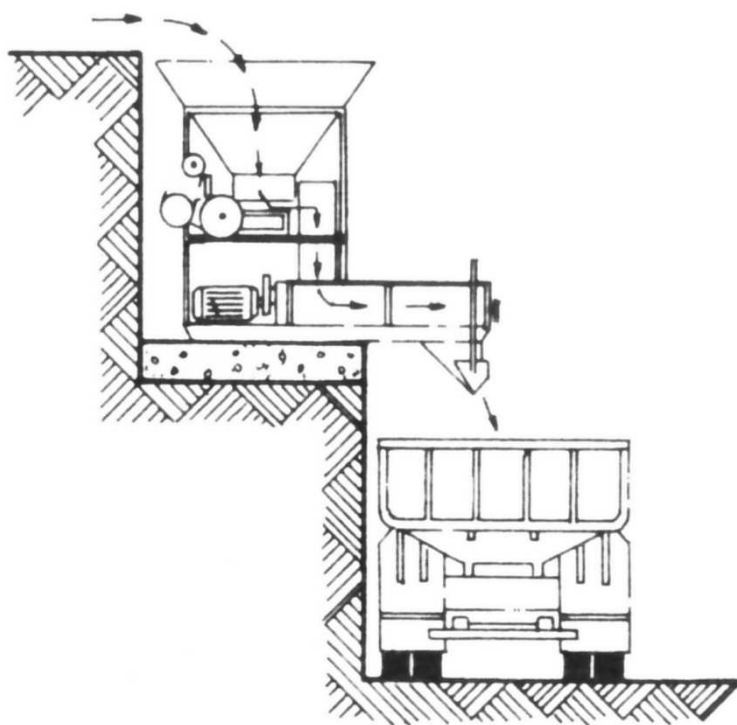


Figura 5 - Procedimento correto de saída do misturador no caminhão (SANTANA, 1992).

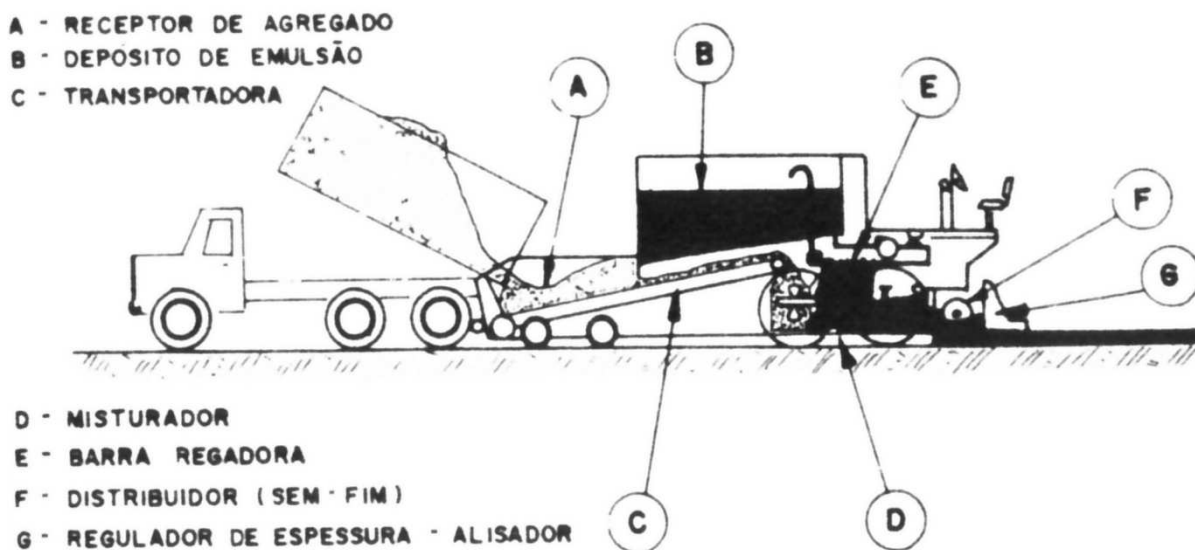


Figura 6 - Usina Móvel (SANTANA, 1992).

2.5.3.2 Transporte e espalhamento

O transporte normalmente é feito em caminhões basculantes, com a tampa traseira perfeitamente vedada, de modo a evitar o vazamento de emulsão sobre a pista. É recomendável que o caminhão possua dois dispositivos para retenção de líquidos no interior da caçamba, e posterior remoção (SANTANA, 1992).

O espalhamento é feita em grande parte com acabadoras, desde as vibro acabadoras automotrizes utilizadas com CBUQ, até as rebocadas. Admite-se em obras de menor porte, ou quando a mistura é estocada em montes pequenos ao longo do trecho a ser asfaltado, o uso de moto niveladora. Já em obras de grande porte, aconselha-se o uso de vibro acabadora com controle eletrônico. A Figura 7 mostra o esquema de uma vibro acabadora automotriz e a Figura 8 mostra uma rebocada.

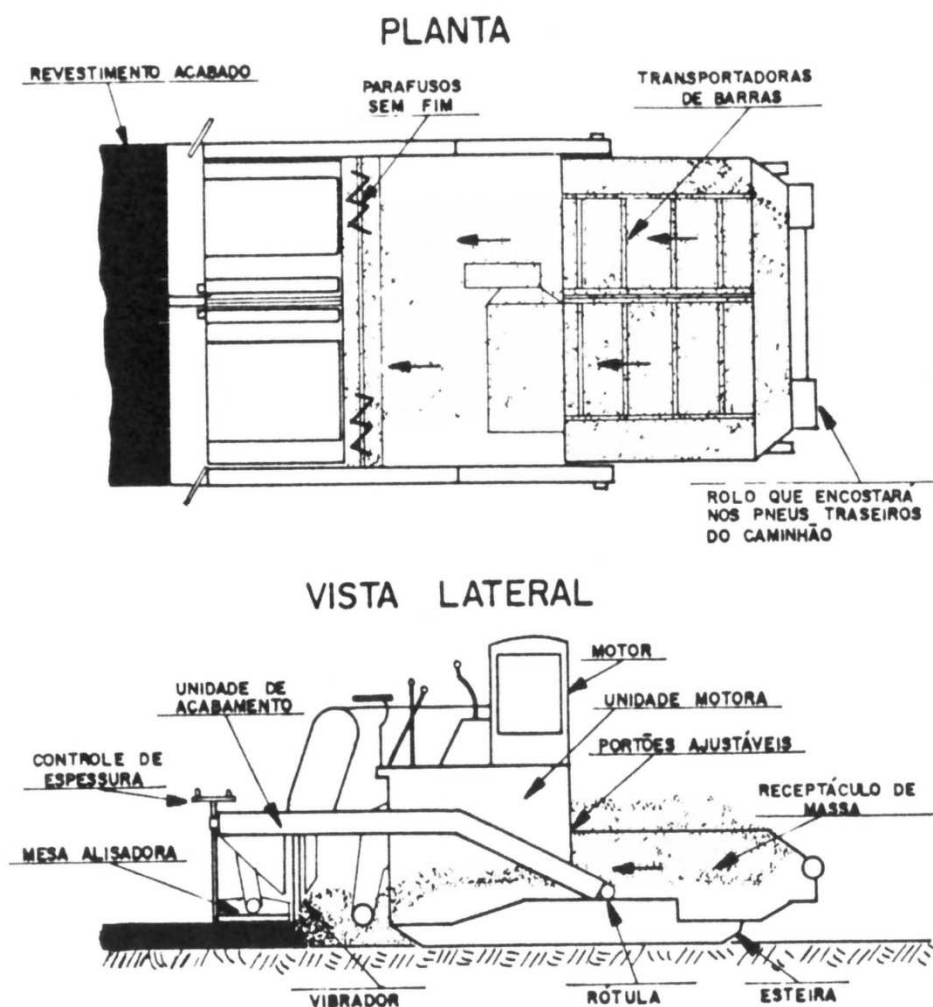


Figura 7 - Esquema de uma vibro acabadora automotriz (SANTANA, 1992)

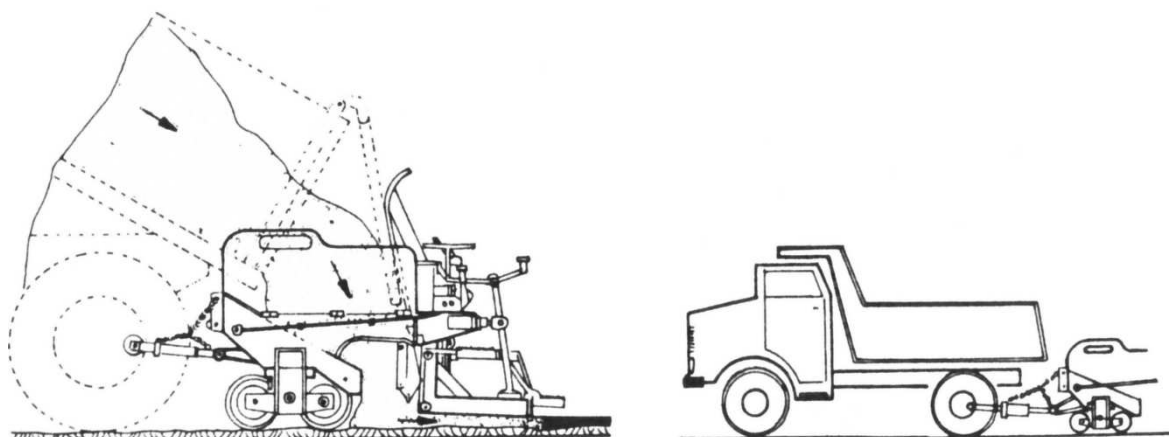


Figura 8 - Acabadora rebocada (SANTANA, 1992).

2.5.3.3 Compactação

O processo de compactação do pré-misturado a frio é dependente do tipo de mistura a ser considerada. Para PMFs abertos e semi-densos, pode-se compactar imediatamente após o espalhamento, ou dar uma cura de 1 a 4 horas. Este fato é explicado pelo teor de água de molhagem, que é pequeno neste caso, não tendo muito sentido o conceito de umidade ótima de compactação.

Já no caso dos PMFs densos, deve-se procurar compactar próximo da umidade ótima determinada em laboratório, já que normalmente, considera-se que h_{ot} no campo é igual ao laboratório, embora se saiba que isto depende do tipo de rolo usado na compactação e suas respectivas energias.

Assim, no caso de obras com PMFD, devem-se retirar amostras para determinação do teor de umidade após o espalhamento. Santana (1992) recomenda que simultaneamente a retirada das amostras, molde-se corpos de prova Marshall, de modo a se traçar a curva densidade aparente versus teor de umidade, pois tais dados servem de ótima fonte de pesquisas futuras.

Para a compactação dos PMFs, são usados geralmente os seguintes rolos: pneumático (pn), liso tandem (lt), vibratório pneumático (vp), vibratório liso (vl). As Figura 9 e Figura 10 mostram alguns dos tipos de rolo citados.

Um esquema usual de compactação deve ser estruturado da seguinte forma, onde p significa o número de passadas do rolo e h a espessura do pavimento:

- PMF (todos os tipos) com $h \leq 6\text{cm}$:
 - o 2p (lt) $\rightarrow$ 3p (pn $\approx$ 80psi) $\rightarrow$ 3p (pn $\approx$ 120psi) $\rightarrow$ 2p (lt).
- PMFA/sD com $h > 6\text{cm}$:
 - o 2p (lt) (sem vibrar) $\rightarrow$ 4p (vl) (vibrando) $\rightarrow$ 2p (vl) (sem vibrar) ou
 - o 2p (vp) (sem vibrar) $\rightarrow$ 4p (vp) (vibrando) $\rightarrow$ 2p (vp) (sem vibrar).

É interessante continuar a compactação nos 2 dias seguintes a abertura do tráfego. A emulsão deve estar totalmente rompida antes da abertura do tráfego.



Figura 9 - Rolo liso tandem



Figura 10 - Rolo vibratório pneumático

3 Abordagem Logística Sobre Aeroportos da Amazônia

3.1 Histórico

Até a década de 50 existiam apenas 17 aeroportos na região amazônica, dentre os quais apenas Belém (PA) e Manaus (AM) eram pavimentados. Devido a necessidade de ampliação da malha aeroviária para o desenvolvimento da região amazônica, o Ministério da Aeronáutica cria em 1954, através do então Comando da 1ª Zona Aérea, a comissão mista Força Aérea Brasileira (FAB)/Superintendência do Plano de Valorização Amazônica (SPVA), que após sete meses é transformada em Comissão de Aeroportos da Região Amazônica (COMARA).

O objetivo inicial da COMARA era construir, ampliar e pavimentar 56 pistas de pouso e decolagem nas principais cidades da região. Tinha-se a estratégia de criar uma malha de pistas distantes umas das outras de 300 km. A missão da COMARA se ampliou e em mais de 50 anos de existência foram realizadas obras de pavimentação em aeródromos em mais de mais de 150 municípios, mais de 70 obras de edificações aeroportuárias e vias públicas, além de apoiar diversos órgãos federais, Exército, Marinha, Fundação Nacional do Índio (FUNAI), SUDAM, Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária (INFRAERO) entre outros. A Figura 11 mostra o acervo de obras realizado pela COMARA em mais de 50 anos de história.



Figura 11 - Acervo de obras realizadas pela COMARA (AMARAL, 2009)

3.2 Panorama Atual

3.2.1 Localidades

Em 2009, a COMARA realiza obras de infra-estrutura aeroportuária e edificações em 14 localidades, distribuídas nos seguintes estados: Acre, Amazonas, Pará, Amapá e Rondônia. A Tabela 5 mostra as localidades por estados e a Figura 12 ilustra a posição geográfica destas.

Tabela 5 - Presença atual da COMARA

Estado	Localidade
Amapá	Oiapoque
Pará	Tiriós
Amazonas	Manaus Moura São Gabriel da Cachoeira Tunuí Cachoeira Yauaretê Tabatinga Palmeiras do Javari Eirunepé Estirão do Equador
Rondônia	Porto Velho Vilhena
Acre	Santa Rosa dos Purus



Figura 12 - Posição geográfica das localidades (AMARAL, 2009)

3.2.2 Clima

As informações sobre o comportamento do clima são de fundamental importância para o desenvolvimento de um planejamento adequado de realização de obras de uma determinada localidade. A região Amazônica apresenta um clima equatorial quente e úmido, sendo muito comuns períodos chuvosos nos locais das construções durante o ano. Tais aspectos dificultam o planejamento de transporte de máquinas, insumos e mão-de-obra, além de tornarem a execução dos serviços dificultosa.

Assim, torna-se necessário o conhecimento do clima da região com o objetivo de planejar da melhor forma possível o período ótimo em que se deve trabalhar na obra. A Figura 13 mostra exemplos de problemas enfrentados na região devido aos aspectos climáticos. A Figura 14 mostra a distribuição climática da região amazônica.



Figura 13 - Problemas enfrentados na obra durante época de chuva (AMARAL, 2009)

3.2.3 Regime Hidrográfico

A COMARA transporta mais de 95% dos materiais e insumos para as obras através do modal fluvial. Tal meio de transporte é sensível ao período de secas e cheias dos rios, pois dependendo da profundidade do rio, do calado da embarcação e da quantidade de carga transportada podendo a segurança e a viabilidade do transporte ficarem comprometidas.

Assim, é de extrema importância o conhecimento sobre o período de navegabilidade dos rios para que um planejamento possa ser elaborado de forma a atender as necessidades das obras nas diferentes localidades. A Tabela 6 mostra o período de navegabilidade dos rios da região amazônica.

Tabela 6 - Período de navegabilidade dos rios

Período Rios	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
RIO NEGRO												
RIO JAVARI												
RIO JURUÁ												
RIO JAPURÁ												
RIO PURUS												
RIO IÇANA												
RIO IÇA												

Legenda:		PERÍODO CHEIO		PERÍODO SECO		NAVEGAÇÃO COM CUIDADO
----------	--	------------------	--	-----------------	--	--------------------------

Fonte: Amaral (2009)

3.2.4 Transporte

A COMARA utiliza basicamente três modais para a realização do transporte de insumos e pessoal na região amazônica. Tais modais são o aéreo, fluvial e rodoviário.

3.2.4.1 Modal Aéreo

O modal aéreo utilizado pela COMARA é composto de duas aeronaves: o C-130 Hércules e o C-105 Amazonas. As principais vantagens deste modal são a rapidez e agilidade, gerando um nível baixo de estoque em trânsito, a não dependência da topografia e a grande flexibilidade. Entretanto, o modal aéreo representa altos custos, é suscetível a interferência atmosférica, necessita de uma pista de pouso e decolagem para realização de embarques e desembarques, além de possuir restrições quanto à quantidade de carga a ser transportada. A quantidade de carga transportada anualmente através deste modal é de aproximadamente 500 toneladas por ano.

3.2.4.2 Modal Rodoviário

O modal rodoviário praticamente não é utilizado para o transporte de insumos e mão-de-obra pela COMARA. As grandes distâncias entre os centros distribuidores de insumos e o local das obras, além das condições topográficas da região amazônica quase que impossibilitam a utilização deste modal. A maior parte do que é transportado se dá dentro da própria localidade da obra.

3.2.4.3 Modal Fluvial

Devido às condições geográficas da região amazônica, o modal mais utilizado pela COMARA para o transporte de insumos é o fluvial, com mais de 95% da carga total transportada. A grande quantidade de rios navegáveis na região favorece a utilização deste modal. As principais vantagens e desvantagens do transporte fluvial são:

- Vantagens:
 - o Baixo custo;
 - o Alta capacidade de transporte de carga;
- Desvantagens:
 - o Lentidão no transporte;
 - o Dependência do estado de cheia e vazão dos rios;
 - o Elevado tempo de carga e descarga do material transportado.

A COMARA possui uma frota de oito empurradores e quatorze balsas, que transportam em média 40.000 toneladas por ano de materiais. A Figura 15 ilustra o transporte fluvial realizado pela COMARA.



Figura 15 - Transporte realizado por balsas (AMARAL, 2009)

3.2.5 Aquisição de Insumos

A COMARA possui dois centros de distribuição de insumos, localizados em Belém-PA e Manaus-AM. Cada um destes centros serve para estoque de materiais ou como pontos de embarque e desembarque de materiais.

A COMARA possui ainda outros pontos de distribuição, porém de menor alcance e importância:

- Pedreiras, que fornecem agregados para as obras, localizadas em Monte Alegre-PA, Moura-AM e Tiriós-PA;
- Pontos provisórios de transbordo de carga;
- Armazéns de estocagem de materiais localizados em cada obra.

No centro de distribuição localizado em Belém-PA, destaca-se o Pavimaq (Pavilhão de Máquinas), que estoca e distribui cerca de 98% (noventa e oito por cento) dos materiais para maquinário e equipamentos de serviço.

3.2.6 Aspectos Operacionais

A logística de distribuição é uma ferramenta que provê a disponibilidade de insumos na hora e local certo, de acordo com a necessidade específica de cada obra. O panorama atual da região amazônica mostra uma série de dificuldades e desafios a serem vencidos para que um serviço de aquisição de insumos eficiente seja possível.

As obras realizadas pela COMARA encontram-se em regiões de difícil acesso e muito distantes dos centros de distribuição. O clima da região amazônica faz com que as obras tenham um tempo curto para sua execução, já que durante o período de chuvas fica quase que impraticável o andamento da mesma. O transporte de insumos depende da navegabilidade dos rios, que é sazonal. Aliado a todos estes fatores, tem-se ainda a falta de uma malha viária na região, impossibilitando o transporte por terra.

Com todas as restrições impostas para a realização do transporte de insumos, torna-se necessário um estudo logístico aprofundado de forma a aperfeiçoar o tempo de execução das

obras realizadas pela COMARA. A Figura 16 mostra o tempo necessário para se alcançar diversas localidades, tanto através de balsa como de avião.

3.2.7 Mão-de-obra

A mão-de-obra é um grande obstáculo para a COMARA. Devido à natureza das obras realizadas, quase sempre em lugares isolados, há uma grande dificuldade na contratação de trabalhadores especializados para a realização dos diversos serviços requeridos em uma obra de infra-estrutura aeroportuária.

Grande parte da mão-de-obra especializada contratada pela COMARA é originária de Belém-PA, onde fica localizada a sede da organização. Quando há a disponibilidade na região da obra, contratam-se trabalhadores da localidade, principalmente para os cargos auxiliares.

Há ainda grande falta de engenheiros, devido principalmente ao fato de a COMARA utilizar mais engenheiros militares. Assim, existe uma carência no que diz respeito a engenheiros de obra.

Quanto ao transporte da mão-de-obra oriunda de Belém, a maioria é levada através do modal aéreo para as localidades das obras, permanecendo nesta durante um período pré-estabelecido e só então retornando ao local de origem.

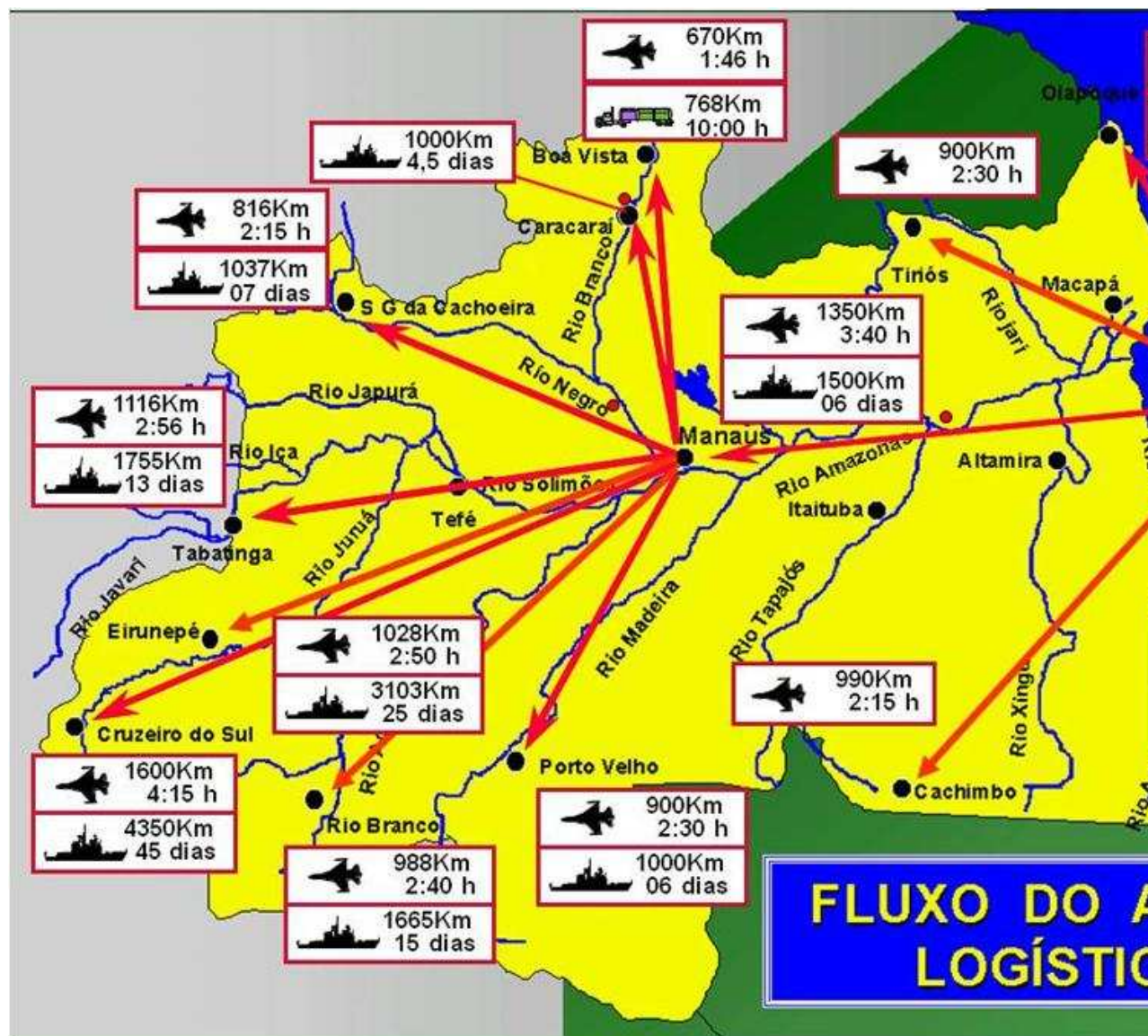


Figura 16 - Tempo para alcançar as diversas localidades (AMARAL, 2009)

4 Análise de Viabilidade

4.1 Introdução

O PMF é sem dúvida o produto mais executado com emulsões asfálticas. É um tipo de mistura de fácil obtenção e aplicação na pista, o que faz com que cada vez mais ganhe espaço, principalmente em casos onde se pretende reduzir custos. Assim, a solução com o pré-misturado a frio vem sendo cada vez mais utilizada como alternativa na execução de bases e revestimentos asfálticos. Entretanto, mesmo apresentando um enorme potencial para utilização como camada de revestimento, sua maior utilização no Brasil é na execução de camada de regularização e reforço da estrutura do pavimento, além de serviços rotineiros do tipo tapa buracos.

Como já apresentado no capítulo 2, o PMF pode ser classificado como aberto, semi-denso e denso. Os PMFsA podem ser aplicados como camada de revestimento ou camada intermediária, apresentando a vantagem de elevada rugosidade, o que permite uma ótima aderência pneu/pavimento, diminuindo os riscos de derrapagem. Pode ainda ser utilizado como camada intermediária ou de transição, compatibilizando o módulo resiliente de uma camada de concreto betuminoso usinado a quente. Assim, devido à facilidade de produção, estocagem, transporte, aplicação e manuseio no campo, os PMFs abertos são uma ótima solução para vias de tráfego leve e médio, tendo a vantagem de poder ser armazenado por mais tempo do que o PMF denso, acarretando em flexibilidade na programação do serviço.

O PMF do tipo denso possui aparência de concreto asfáltico a quente, possuindo baixo índice de vazios, apresentando, portanto, excelente comportamento estrutural e funcional para vias de tráfego médio, proporcionando um ótimo acabamento na superfície e excelente conforto ao rolamento. Vale ressaltar que ambos os tipos de PMFs descritos possuem a vantagem de liberar para o tráfego a camada executada de forma imediata.

4.2 Vantagens e Desvantagens

Para avaliar a viabilidade da utilização de PMFs em camadas de pavimentos em aeródromos, é importante avaliar os possíveis benefícios oriundos da utilização da mistura a frio em detrimento do CBUQ. Os dois tipos de misturas acarretam benefícios e desvantagens decorrentes de sua utilização.

A utilização do PMF traz como principais vantagens:

- Aplicação a frio;
- Utilização de maquinário simples;
- Podem ser produzidas em locais de difícil acesso, reduzindo os custos de transporte e facilitando a logística envolvida;
- São aplicadas de forma rápida;
- Possibilidade de utilização de agregados úmidos, dispensando a secagem e o aquecimento dos agregados;
- Devido à adesividade das emulsões asfálticas catiônicas, há a possibilidade de se utilizar agregados britados originários de quase qualquer rocha;
- Possibilidade de estocar a mistura asfáltica;
- Facilidade de produção, estocagem, transporte, aplicação e manuseio da massa asfáltica no campo;
- Redução do risco de perda dos materiais usinados;
- Aumento da produtividade na aplicação, devido à facilidade de manuseio e transporte, utilização de equipamentos e usinas de asfalto de pouca complexidade;
- Possibilidade de aplicação da mistura asfáltica sobre superfícies úmidas;
- Elevada capacidade de suporte às grandes deflexões das camadas subjacentes, sem fissurar ou trincar;
- Diminuição na emissão de gases tóxicos e poluentes, melhorando as condições de saúde e segurança e preservando o ambiente.
- Possibilidade de estabilização da mistura com Cimento Portland, aumentando assim a coesão inicial e a resistência mecânica, acarretando em uma liberação mais rápida do tráfego.

Quando comparado com o CBUQ, o pré-misturado a frio apresenta como vantagens:

- Baixo custo de preparação da mistura, principalmente em relação à usinagem, já que no caso do PMF, as centrais a frio não necessitam de tambor rotativo secador, recuperador de filler, dosificador secundário.

- Baixo custo dos equipamentos necessários para a produção;

- Baixo consumo de energia térmica e elétrica envolvida durante a operação de transporte, manuseio, estocagem e aplicação dos materiais (cerca de 70% da energia consumida pelas misturas asfálticas a quente);

- Transporte menos crítico do que as misturas a quente, dispondo-se de mais tempo para as eventualidades;

- Menor risco de incêndios, explosões e acidentes de trabalho;

Entretanto, os PMFs possuem limitações em sua utilização. Dependendo da carga de tráfego, sua aplicação pode não ser vantajosa quando comparado com o CBUQ. A mistura a frio apresenta maior desgaste ao uso, envelhecimento mais rápido, além de exigir um tempo para cura.

Já um projeto bem executado com CBUQ deve apresentar máxima impermeabilidade ao ar e a água, estabilidade e resistência à fadiga satisfatória para qualquer valor de N em 30 anos e características superficiais de conforto e segurança, quando aplicados com revestimentos. As principais características vantajosas do CBUQ quando comparado ao PMF são:

- Mais duráveis;
- Menos sensíveis a ação da água e do ar;
- Apresentam uma taxa de envelhecimento mais lenta;
- Suportam muito bem o tráfego pesado;
- Não exigem cura;

Como principais desvantagens da aplicação do CBUQ podem-se destacar:

- Dificil fabricação, exigindo mão-de-obra mais especializada do que a aplicação com PMF;

- Exigem aquecimento do agregado;
- Alto custo de fabricação;
- Necessidade de equipamento especial para o processo construtivo;
- Não permitem estocagem;
- Acarreta em maior dano ao meio ambiente;

4.3 Contextualização para os aeródromos da região amazônica

É importante entender os possíveis benefícios que a utilização do PMF como camada de revestimento nos aeródromos da região amazônica pode trazer para a COMARA. Como visto na seção anterior, a utilização do pré-misturado a frio traz inúmeras vantagens em vários aspectos.

Em se tratando de custos, é fato que quando comparado com o CBUQ, o PMF possui valores bem mais baratos. O Anexo A mostra a composição detalhada do custo unitário de referência para o CBUQ – capa de rolamento e para o pré-misturado a frio para o estado do Pará, local da sede da COMARA. A Tabela 7 resume o Anexo A.

Tabela 7 - Comparação de custos unitários

Tipo de Revestimento	Execução (R\$/m ³)		Usinagem (R\$/m ³)	Preço Total (R\$/m ³)
	Equipamento	Mão-de-obra		
PMF	23,37	5,58	44,25	87,54
CBUQ	15,87	4,09	81,70	121,58

Pode-se ver que o CBUQ é cerca de 40% mais caro do que o PMF. Analisando apenas os custos unitários relacionados à usinagem, o CBUQ é quase que duas vezes mais caro do que o PMF. Esta diferença de valores se deve principalmente ao fato de que o pré-misturado a frio não necessita de aquecimento em sua preparação. Todo o processo é realizado a temperatura ambiente. É necessária uma energia muito maior na fabricação da mistura a quente, onde há a necessidade de equipamentos mais sofisticados em sua usinagem.

Em relação à logística envolvida no processo de construção de aeródromos da COMARA, a utilização do PMF traz claramente benefícios. O maquinário utilizado na preparação da mistura a frio é bem mais simples quando comparado com o CBUQ, o que facilita o transporte, fator crítico na COMARA, e facilita até mesmo a produção em locais de difícil acesso.

Outro fator muito importante é a possibilidade de estocagem da massa asfáltica, já que o CBUQ não permite isto. A região amazônica é uma localidade onde o clima influencia de forma determinante o andamento da obra. As constantes chuvas na região atrasam os prazos previstos, sendo necessário um planejamento eficaz na obra. O fato de o PMF poder ser estocado é fator de extrema relevância, já que durante eventuais paralisações da obra, a massa asfáltica pode ser guardada e utilizada posteriormente.

Os aspectos operacionais são afetados de forma direta devido à utilização do PMF. A produtividade da mistura asfáltica a frio é superior ao CBUQ, devido à facilidade de estocagem, produção e manuseio da mistura, além da menor complexidade dos equipamentos envolvidos na sua produção. Este aumento de produtividade ocasiona uma redução dos prazos de execução da obra e mobilização de insumos, fatores críticos nas obras realizadas pela COMARA.

Entretanto, deve-se olhar com atenção o comportamento do PMF em serviço, analisando se um pavimento executado com este tipo de mistura é capaz de agüentar os esforços ao qual será submetido durante sua vida útil.

4.4 Análise de fadiga

Com o intuito de analisar a viabilidade da utilização do PMF nas pistas de pouso e decolagem dos aeroportos da região amazônica, torna-se indispensável, na falta de ensaios práticos, a realização de uma simulação para determinação da resistência a fadiga do pavimento, através do parâmetro N_f (número de repetições de carga até a ruptura – vida de fadiga). Para a consecução deste objetivo, foi utilizado o *software* WFLAPS.

Roso (2007) analisa o comportamento a fadiga de várias amostras de misturas asfálticas (a quente e a frio). Para a análise realizada neste trabalho, foram escolhidos três tipos de amostras dentre as analisadas por Roso (2007):

- PMF Denso – Faixa C DNER ES 390/99 – Emulsão RL-1C Convencional;
- PMF Denso – Faixa C DNER ES 390/99 – Emulsão RL-C Modificada – Flex;
- CBUQ Convencional – DNER ES 385/99.

As amostras foram escolhidas dentre as possíveis alternativas para uso em pavimentos aeroportuários. Com tais alternativas, é possível comparar a resistência ao trincamento por fadiga do CBUQ convencional com o PMF (com ou sem adição de polímeros).

Para a determinação de N_f , é necessário conhecer alguns parâmetros das misturas asfálticas analisadas. A equação (19) mostra a fórmula para a determinação de N_f .

$$N_f = K \cdot \varepsilon_t^{-n} \quad (19)$$

Os parâmetros k e n são originários da lei de fadiga e dependem da temperatura e do tempo de carregamento. Tais parâmetros são obtidos através de um ensaio de deformação controlada. A Tabela 8 mostra os valores para cada uma das misturas analisadas. O parâmetro ε_t é a deformação de tração no centro de aplicação da carga de roda e é medido na base inferior da camada de revestimento (na seção entre o revestimento e a base).

Tabela 8 - Parâmetros da lei de fadiga

Mistura	n	K
PMF	3,72	1,13E-07
PMF com polímero	3,82	1,97E-07
CBUQ	4,41	3,10E-09

Para a utilização do *software* WFLAPS, são necessários vários parâmetros e características do pavimento a ser simulado. As figuras Figura 17 e Figura 18 mostram a tela do programa e os dados de entrada.

The screenshot shows the WFLAPS software interface with the following input fields and values:

- Número de camadas de pavimento: 2
- Número de pontos extras a serem analisados: 0
- Carga de eixo: 80 tf
- Pressão de inflação dos pneus: 18 kgf/cm²
- Tipo de Eixo: Eixo Simples Roda Simples
- Continua >> button

Figura 17 - Tela de entrada do software WFLAPS (parâmetros gerais)

The screenshot shows the '1ª camada' (1st layer) input screen of the WFLAPS software. The interface includes the following fields and controls:

- Tipo de material:** A dropdown menu set to 'Asfáltico'.
- Espessura da camada:** A text input field with '7' and a unit dropdown set to 'cm'.
- Coeficiente de Poisson (ν):** A text input field with '.33'.
- Ângulo de atrito f (graus):** A text input field with '45'.
- Coesão (c):** A text input field with '35'.
- Número de divisões da camada:** A dropdown menu set to '5'.
- Peso específico (γ):** A text input field with '.0018' and a unit dropdown set to 'kgf/cm³'.
- Método de cálculo do módulo de resiliência:** A dropdown menu set to 'Linear'.
- Módulo de Young (E):** A text input field with '2720000000' and a unit dropdown set to 'N/m²'.
- M_R = E:** A label indicating that the modulus of resilience is equal to the modulus of Young.
- Navigation buttons:** '<< Volta' and 'Continua >>' buttons at the bottom.

Figura 18 - Tela de entrada do software WFLAPS (dados da camada)

Para todos os três tipos de misturas, optou-se pela utilização de duas camadas de pavimento, mais o subleito. Foram feitas as análises para três situações de tráfego distintas, variando-se a carga de eixo entre 13tf e 80tf, e a pressão de inflação dos pneus variando entre 5kgf/cm² e 18kgf/cm². O limite superior é justificado devido ao peso bruto máximo do C-130 Hércules, que é a aeronave crítica operada pela COMARA.

Como aproximadamente 95% do peso da aeronave são suportados pelo trem de pouso principal da aeronave, considerou-se o peso máximo de decolagem desta igual à carga de eixo. O eixo é o tandem duplo de roda simples. A Tabela 9 resume as características e parâmetros para cada uma das camadas.

Tabela 9 - Parâmetros das camadas

Camada		Espessura (cm)	MR (MN/m ²)
Revestimento	PMF	7	2372.14
	PMF c/ polímero	7	2757.36
	CBUQ	7	5925.15
Base		20	200.00
Subleito		1000	120.00

Assim, após a realização das simulações, obtiveram-se os resultados mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores de deformação obtidos

Peso do Eixo (tf)	Pressão de inflação (kgf/cm ²)	ε_t		
		PMF	PMF c/ polímero	CBUQ
13.0	5.0	8.71E-05	3.50E-05	1.23E-05
46.5	11.5	2.60E-04	2.18E-04	8.73E-05
80.0	18.0	4.02E-04	3.36E-04	1.20E-04

Com os valores de deformação obtidos pelo *software* WFLAPS, calcula-se o valor de N_f através da equação (19). Os valores obtidos para cada um dos revestimentos são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores de N_f para cada revestimento analisado

Peso do Eixo (tf)	Pressão de inflação (kgf/cm ²)	N_f		
		PMF	PMF c/ polímero	CBUQ
13.0	5.0	1.47E+08	1.97E+10	1.45E+13
46.5	11.5	2.51E+06	1.83E+07	2.55E+09
80.0	18.0	4.96E+05	3.53E+06	6.32E+08

Pode-se notar que o número de repetições de carga até a ruptura é bastante superior quando se utiliza CBUQ na camada de revestimento. Percebe-se também que a adição de emulsão modificada por polímero altera bastante a propriedade da camada de PMF, aumentando sua resistência ao trincamento por fadiga.

Fixando-se um horizonte de 20 anos para o projeto da pista de pouso e decolagem, podem-se encontrar o valor N de tráfego diário de aeronaves para cada uma das alternativas analisadas, de modo que ocorra o trincamento por fadiga. A Tabela 12 mostra os valores obtidos.

Tabela 12 - Valores de N para trincamento em 20 anos

Peso do Eixo (tf)	Presssão de inflação (kgf/cm ²)	N		
		PMF	PMF c/ polímero	CBUQ
13.0	5.0	20168	2705177	1984231000
46.5	11.5	344	2511	349412
80.0	18.0	68	484	86564

Como o número de operações da COMARA nas pistas de pouso e decolagem da região amazônica é muito inferior aos valores de N obtidos, pode-se concluir que a utilização de PMF (com ou sem polímero) como camada de revestimento apresenta comportamento satisfatório quanto à ruptura por fadiga.

Com relação à estabilidade, as misturas foram dosadas através do método Marshall. Os valores de estabilidade Marshall encontrados para cada uma das misturas são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores de Estabilidade Marshall

Mistura	Estabilidade Marshall (kgf)
PMF	696
PMF com polímero	884
CBUQ	1043

Pode-se notar que todas as misturas apresentam valores significativos de estabilidade. Entretanto, para o projeto de aeroportos onde há movimento de aeronaves de grande porte, o valor da estabilidade Marshall deve ser no mínimo 950kgf. Assim, apenas a mistura a quente (CBUQ) atinge este pré-requisito.

Para que a mistura a frio alcance o valor de estabilidade necessário, basta que uma nova mistura com outra granulometria seja dosada, ou seja, deve-se ajustar a mistura (por exemplo, aumentar a quantidade de areia) para que o valor mínimo de estabilidade seja alcançado.

Destaca-se novamente a melhora das propriedades da mistura a frio com a adição de emulsão modificada por polímero. Isto corrobora para o fato de que, no caso em questão, a melhor alternativa é a utilização do pré-misturado a frio modificado com polímero.

4.5 Utilização de PMF na COMARA

4.5.1 Introdução

No ano de 1999, no município de Jacareacanga-PA, a COMARA realizou uma tentativa de utilização do pré-misturado a frio, como solução para o revestimento da pista de pouso e decolagem local. Entretanto, após pouco tempo de utilização da pista recém construída, ocorreu o afundamento desta, com o aparecimento de trilhas de roda.

Para a análise dos acontecimentos em Jacareacanga-PA, será utilizado o depoimento do Sargento Senna (2009), militar que ainda hoje trabalha na COMARA e participou ativamente da tentativa de utilização de PMF. Entretanto, faltam detalhes para uma narrativa mais detalhada dos acontecimentos, já que não há nenhum dado nos arquivos da COMARA que possa auxiliar no exame dos fatos.

4.5.2 Depoimento

De acordo com Senna (2009), os parâmetros e especificações do projeto da mistura eram:

- O processo construtivo do pavimento seguiu o previsto nas notas de serviço e nos controles tecnológicos;
- O agregado graúdo era constituído por seixo rolado;
- Foi utilizado areia de jazida como agregado miúdo (não há dados de granulometria), não tendo sido utilizado filler;
- Para a preparação do traço do PMF, iniciou-se a realização de ensaios dos componentes da mistura:
 - o Areia: granulometria, equivalente areia, densidade real e densidade aparente;
 - o Seixo: granulometria, densidade real, densidade aparente, abrasão los Angeles e adesividade;

o Emulsão RL-1C: viscosidade Saybolt-Furol, resíduo por evaporação.

- O PMF era classificado como semi-denso, não havendo dados do volume de vazios exato da mistura e da porcentagem de agregados passantes nas peneiras;
- Foram construídos vários corpos de prova, variando-se o teor residual de CAP e obedecendo-se a seguinte sequência: molhagem dos agregados, mistura da emulsão com os agregados, cura da mistura em temperatura ambiente (máximo de uma hora), compactação Marshall com 75 golpes em cada face, colocação dos CPs em estufa a 60°C por 24 horas no molde, colocação dos CPs em temperatura ambiente por duas horas, extração do CP do molde e pesagem (normal e imersa), colocação dos CPs em estufa a 40°C por 2 horas e rompimento dos CPs
- Os parâmetros Marshall foram encontrados dentro do esperado, de acordo com a norma DNER-ME 107/94, não havendo valores do traço final da mistura;



Figura 19 - Usina PMF

As máquinas e equipamentos utilizados durante a execução da obra foram:

- Usina de PMF com capacidade igual a 40 Ton/h da marca CIBER;
- Vibro acabadora pneumática de asfalto da CIBER;
- Rolo de pneus Tema Terra SP-5000 de pressão variável (80 a 120 psi);
- Rolo tandem com capacidade de 10 toneladas;

- Caçambas LK-1620 da Mercedes com capacidade de 6 m³;
- Pá mecânica case W-20;
- Caminhão tanque para transporte de emulsão.

Senna (2009) relata ainda que foi executado o controle tecnológico, tendo sido realizados os ensaios descritos anteriormente para a determinação dos parâmetros dos componentes da mistura. Em relação ao controle tecnológico durante a fase de execução do PMF, Senna (2009) relata que foi seguido à especificação NSMA-85-2 (Normas de Infra-Estrutura da Aeronáutica). Em relação à estocagem do PMF, o material era coberto para evitar o contato com o meio externo e para proteger das chuvas.



Figura 20 - Caminhão basculante

O PMF preparado na usina e estocado por 24 horas era carregado em caçambas e transportado até a vibro acabadora. Após o espalhamento da mistura, aplicava-se uma pequena camada de areia fina para então iniciar a compactação.

O processo de compactação se dava na seguinte sequência:

- Duas passadas de rolo liso tandem;
- Três passadas de rolo pneumático 80 psi;
- Três passadas do rolo pneumático 120 psi;
- Duas passadas de rolo liso tandem.

Após o processo de compactação, retirava-se a areia e aplicava-se uma capa selante.

Senna (2009) relata ainda que não houve treinamento de pessoal para a realização da experiência com PMF. Os funcionários não tiveram oportunidade de visitar alguma obra onde a solução foi utilizada. Os técnicos envolvidos não realizaram cursos ou assistiram palestras sobre a confecção e aplicação do PMF. Assim, foi utilizada a experiência dos funcionários com CBUQ para a realização da obra.



Figura 21 - Vibroacabadora

Para a mobilização dos recursos necessários para a realização da obra, 70% dos equipamentos foram transportados de C-130 baseados em Belém e Manaus. Os outros 30% foram transportados pela transamazônica, pelo trecho Rio Branco - Porto Velho - Jacareacanga. Em relação à emulsão, 30% foram transportadas pela aeronave C-130 baseada em Manaus, e os 70% restantes foram transportados por balsa, pelo trecho Manaus – Itaituba - Jacareacanga (Rio Tapajós).

Senna (2009) relata alguns pontos considerados como causadores do insucesso na experiência da COMARA com PMF:

- O solo laterítico utilizado na confecção da base não possuía um CBR final igual a 80% (projeto), considerando-se 95% da densidade máxima de laboratório, correspondente a umidade ótima. O solo só alcançava este valor com grau de compactação igual a 100%;

- Podem ter ocorrido falhas no projeto do pavimento, cuja aeronave era o C-130;

- Deveria ter-se utilizado uma base estabilizada com cimento para alcançar o CBR exigido;

- Houve mudança de greide do projeto original, que receberia uma nova base em solo laterítico em toda a sua extensão, aterrando a existente.

- As chuvas atrapalharam muito a execução da obra, retirando a emulsão antes de romper. O PMF não era aplicado na pista com o tempo quente, devido às chuvas, o que atrapalhava a cura.

4.5.3 Motivo do insucesso

Para uma análise mais detalhada dos motivos de insucesso da experiência da COMARA com o PMF, seria necessária uma maior quantidade de dados e observações a cerca de como se deu o preparo e execução da mistura em Jacareacanga-PA. Entretanto, com os dados fornecidos por Senna (2009), é possível apontar algumas razões que contribuíram para o afundamento em trilha de roda da pista construída com a mistura a frio.

Em relação aos materiais componentes da mistura, parecem terem sido realizados alguns dos ensaios exigidos pela norma DNER-ES 317/97. Além disso, não há relato e dados de nenhum destes ensaios.

Além dos ensaios descritos por Senna (2009), deveriam ter sido feitos adicionalmente os seguintes:

- Para o ligante betuminoso:

- o Para todo carregamento que chegar a obra:

- Peneiramento;
 - Carga de partícula.

- o Para cada 100t:

- Ensaio de sedimentação;
 - Ensaio de desemulsibilidade;

- Ensaio de destilação.

- Para os agregados:

O Ensaio de índice de forma, para cada 900 m³.

Sabe-se apenas que o PMF era classificado como semi-denso, o que não parece ser fator crítico, já que o número N de movimentações da aeronave de projeto C-130 é muito baixo. Entretanto, seria importante o conhecimento dos valores obtidos pela dosagem Marshall, principalmente referente à estabilidade.

Quanto às máquinas e equipamentos utilizados, parecem todos de acordo com o esperado. A execução do PMF parece ter sido realizada de forma satisfatória, apesar de não se dispor de detalhes das fases de misturação, espelhamento e compactação da mistura.

Os fatores considerados potenciais causadores das falhas na pista de Jacareacanga são:

- O solo utilizado como base não possuía CBR adequado com as especificações de projeto. De acordo com Senna (2009), nada foi feito para que a base alcançasse o CBR exigido;

- Houve mudança no greide do projeto original, que deveria receber nova base em solo laterítico;

- A execução da camada de PMF era realizada com o tempo chuvoso;

- Deveria ter sido utilizado seixo britado como agregado graúdo, e não seixo rolado;

- Não ocorreu nenhum tipo de treinamento de pessoal para a execução do trabalho com misturas a frio.

Todos os quatro fatores apontados podem ter sido decisivos para a falha estrutural do pavimento. Entretanto, entende-se que a execução da camada de PMF com tempo chuvoso é o mais relevante destes.

De acordo com a norma DNER-ES 317/97, os pré-misturados devem ser distribuídos somente quando a temperatura ambiente se encontrar acima de 10°C e com o tempo não chuvoso. A chuva atrapalha a cura da mistura, além de lavar a mistura, retirando a emulsão.

5 Considerações finais

5.1 Síntese do trabalho

Este trabalho de graduação teve como objetivo analisar a viabilidade do uso de misturas asfálticas pré-misturadas a frio como solução para revestimento de pistas de pouso e decolagem da região amazônica, construídas e mantidas pela COMARA. A possível utilização do PMF origina inúmeras vantagens, tanto do ponto de vista econômico, já que as misturas a frio acarretam em menor custo quando comparadas com as misturas a quente, quanto em relação à logística envolvida nas obras de infra-estrutura realizadas na região amazônica.

O capítulo 1 dedicou-se a desenvolver uma visão geral dos aspectos relevantes quanto à utilização do PMF e suas implicações, bem como a relevância do uso da mistura a frio para a COMARA. Dentro deste contexto, foi apresentado de forma sucinta a COMARA e sua relevância na região amazônica.

Após a apresentação e definição da estrutura do trabalho, o capítulo 2 destinou-se ao desenvolvimento de um estudo teórico acerca dos materiais e processos envolvidos na construção de uma camada de revestimento com PMF, tendo grande relevância para o completo entendimento do assunto, assim como para auxiliar no objetivo do trabalho, que é o de analisar a viabilidade do uso de PMF.

O capítulo 3 realiza uma análise da situação logística encontrada para a realização de obras na região amazônica. Examinaram-se os diferentes modais de transporte das máquinas e equipamentos assim como os fatores intervenientes para a execução da obra, como regime de chuvas e cheia dos rios.

Por fim, com todo o embasamento dado pelos capítulos antecedentes, a seção 4 realiza a análise de viabilidade da utilização do PMF, levando em conta as principais vantagens e desvantagens oriundas de seu uso, um comparativo de custos com a principal técnica utilizada como revestimento, o CBUQ, e um estudo de caso baseado na experiência da COMARA com

o PMF, realizado em 1999 em Jacareacanga-PA. Realizou-se também uma simulação computacional com o software WFLAPS para a verificação da resistência a fadiga sobre a carga de tráfego de um pavimento com PMF (convencional e com polímero) e com CBUQ, comparando-se os resultados obtidos para cada uma das alternativas.

Entende-se que o pré-misturado a frio pode ser utilizado como camada de revestimento das pistas de pouso e decolagem da operadas pela COMARA. Entretanto, é importante que uma dosagem criteriosa seja realizada, de forma a garantir a estabilidade da mistura. O número de operações nos aeródromos operados pela COMARA é baixíssimo, o que contribui de forma decisiva para que o problema do trincamento por fadiga não seja crítico na operação da camada de revestimento.

É importante que a mistura a frio seja modificada por polímero, o que confere a esta uma grande melhora em suas propriedades, principalmente no que diz respeito à estabilidade. O possível problema enfrentado com aeronaves de reação, onde a desagregação do revestimento entra nas turbinas, pode ser facilmente resolvido com a aplicação de uma Lama Asfáltica Grossa.

Assim, este trabalho sugere a utilização de uma mistura asfáltica do tipo PMFD modificada com polímero, dosada de forma a garantir uma estabilidade Marshall próxima de 950kgf. Com relação ao problema enfrentado com as aeronaves de reação, deve-se aplicar uma lama asfáltica logo que a superfície começar a apresentar sinais de desagregação.

5.2 Limitações do modelo proposto

Considera-se que as análises e conclusões apresentadas neste trabalho são de grande relevância para a COMARA, pois não há dúvidas de que o PMF pode ser utilizado com solução para o revestimento de pistas em aeródromos da região amazônica de responsabilidade da COMARA. Entretanto, deve-se considerar uma limitação principal no estudo realizado.

No estudo de caso apresentado, a carência de dados não permitiu uma análise mais detalhada da experiência vivida pela COMARA em sua tentativa de utilização de PMF. Assim, os problemas apresentados como causadores do insucesso da mistura a frio na pista de

Jacareacanga-PA podem não ser os únicos, visto que faltam detalhes para um estudo mais detalhado.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Seria extremamente relevante que trechos experimentais fossem confeccionados de modo a realizar uma análise prática do comportamento do pré-misturado a frio na pista como revestimento, podendo assim avaliar seu desempenho e corroborar com os estudos teóricos apresentados neste trabalho de graduação.

Referências

ABEDA, **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. Soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro, ABEDA, 2001.

AMARAL, Frank Cabral de Freitas. **Apresentação COMARA Mai_09.ppt**. Belém: Comissão de Aeroportos da Amazônia, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9935**: Agregados. Rio de Janeiro, 2005.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica**. Solução Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro, ABEDA, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER 107/94 – ES**: Mistura betuminosa a frio com emulsão asfáltica – ensaio Marshall. Rio de Janeiro. 1994. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER 317/97 – ES**: Pavimentação: pré-misturados a frio. Rio de Janeiro. 1997. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER 385/99 – EM**: Concreto asfáltico com asfalto polímero. Rio de Janeiro. 1999. 15p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER 390/99 – ES**: pré-misturado a frio com emulsão modificada com polímero. Rio de Janeiro. 1999. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER 396/97 – EM**: Emulsões asfálticas catiônicas. Rio de Janeiro. 1997. 04p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER 396/99 – EM**: Asfaltos modificados por polímeros. Rio de Janeiro. 1999. 04p.

MANO, E.B. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1999.

RANCIARO NETO, Adhemar. **Estudo estratégico de implementação de um hub de cargas no Destacamento de Apoio à COMARA em Manaus – AM (DACO-MN)**. 2006. 110 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso. (graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

ROSO, Josué Alves. **Análise do Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas Densas Usinadas a Frio**. 2007.143f. Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

SANTANA, H. **Manual de Pré-Misturados a Frio**. Rio de Janeiro, IBP, 1992.

SENNA. **PMF JACAREACANGA_SGT Senna.docx**. Belém: Comissão de Aeroportos da Amazônia, 2009.

Anexo A – Composição de custos das misturas

DNIT - Sistema de Custos Rodoviários			Construção Rodoviária		
Custo Unitário de Referência		Mês : Julho / 2009	Pará		
2 S 02 530 00 - Pré-misturado a frio			Produção da Equipe : 22,00 m3		
A - Equipamento	Quantidade	Utilização		Custo Operacional	
		Operativa	Improdutiva	Operativo	Improdutivo
E007 - Trator Agrícola - (77 kW)	1,00	0,17	0,83	62,96	12,91
E102 - Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop. 10,9 t (93 kW)	1,00	0,40	0,60	150,11	12,91
E105 - Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t (98 kW)	1,00	0,41	0,59	122,13	12,91
E107 - Vassoura Mecânica - rebocável	1,00	0,17	0,83	4,50	0,00
E149 - Vibro-acabadora de Asfalto - sobre esteiras (74 kW)	1,00	0,56	0,44	126,27	17,69
E404 - Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t (170 kW)	2,47	1,00	0,00	116,57	15,30
Custo Horário de Equipamento					
B - Mão-de-Obra	Quantidade	Salário-Hora			
T511 - Encarreg. de pavimentação	1,00	33,48			
T701 - Servente	8,00	9,08			
Custo Horário da Mão-de-Obra					
Adc.M.O. - Ferramentas: (15,51 %)					
Custo Horário de Execução					
Custo Unitário de Execução					
D - Atividades Auxiliares	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		
1 A 01 397 02 - Usinagem de P.M.F.		1,0000 m3	44,25		
Custo Total das Atividades					
E - Transporte de Materiais	Toneladas / Unidade de Serviço				
M107 - Emulsão asfáltica RM-1C	0,1400				
F - Transporte de Materiais Produzidos / Comerciais	Toneladas / Unidade de Serviço				
1 A 01 170 01 - Areia extraída com escavadeira hidráulica	0,2700				
1 A 01 200 01 - Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h	1,8900				
1 A 01 397 02 - Usinagem de P.M.F.	2,3000				

DNIT - Sistema de Custos Rodoviários		
Custo Unitário de Referência	Mês : Julho / 2009	Construção Rodoviária
2 S 02 530 00 - Pré-misturado a frio		Pará
		Produção da Equipe : 22,00 m3

	Custo Unitário Direto
	Lucro e Despesas Indiretas (
	Preço Unitário

Observações : Especificação de serviço: DNER-ES-317.
 O transporte deve ser calculado na fase de orçamento, com as distâncias médias de transporte de cada trecho, utilizando-se as composições de momentos de transporte do SICRO2.
 As quantidades indicadas nos itens de transporte de materiais referem-se ao consumo de materiais a serem transportados, por unidade de serviço.

DNIT - Sistema de Custos Rodoviários
Custo Unitário de Referência
2 S 02 540 01 - Conc. betuminoso usinado a quente - capa rolamento

Mês : Julho / 2009
Produção da Equipe : 75,00 t

Construção Rodoviária
Pará

A - Equipamento	Quantidade	Utilização Operativa	Improdutiva	Custo Operacional
E007 - Trator Agrícola - (77 kW)	1,00	0,24	0,76	62,96
E102 - Rolo Compactador - Tandem vibrat. autoprop. 10,9 t (93 kW)	1,00	0,56	0,44	150,11
E105 - Rolo Compactador - de pneus autoprop. 25 t (98 kW)	1,00	0,58	0,42	122,13
E107 - Vassoura Mecânica - rebocável	1,00	0,24	0,76	4,50
E149 - Vibro-acabadora de Asfalto - sobre esteiras (74 kW)	1,00	0,81	0,19	126,27
E404 - Caminhão Basculante - 10 m3 - 15 t (170 kW)	1,53	1,00	0,00	116,57
Custo Horário de Equipamento				
B - Mão-de-Obra	Quantidade	Salário-Hora		
T511 - Encarreg. de pavimentação	1,00	33,48		
T701 - Servente	8,00	9,08		
Custo Horário da Mão-de-Obra				

Adc.M.O. - Ferramentas: (Custo Horário de Equipamento Custo Unitário de Equipamento			
D - Atividades Auxiliares	Quantidade	Unidade	Preço Unitário
1 A 01 390 02 - Usinagem de CBUQ (capa de rolamento)	1,0000	t	32,68
Custo Total das Atividades Auxiliares			

E - Transporte de Materiais	Toneladas / Unidade de Serviço	
M101 - Cimento asfáltico CAP 50/70	0,0600	
M905 - Filler	0,0280	
F - Transporte de Materiais Produzidos / Comerciais	Toneladas / Unidade de Serviço	
1 A 01 170 01 - Areia extraída com escavadeira hidráulica	0,2420	
1 A 01 200 01 - Brita produzida em central de britagem de 80 m3/h	0,6705	
1 A 01 390 02 - Usinagem de CBUQ (capa de rolamento)	1,0000	

DNIT - Sistema de Custos Rodoviários		Construção Rodoviária
Custo Unitário de Referência	Mês : Julho / 2009	Para
2 S 02 540 01 - Conc. betuminoso usinado a quente - capa rolamento		Produção da Equipe : 75,00 t
		Custo Unitário Direto
		Lucro e Despesas Indiretas (
		Preço Unitário
Observações :	Especificação de serviço: DNER-ES-313 O transporte deve ser calculado na fase de orçamento, com as distâncias médias de transporte de cada trecho, utilizando-se as composições de momentos de transporte do SICRO2. As quantidades indicadas nos itens de transporte de materiais referem-se ao consumo de materiais a serem transportados, por unidade de serviço.	

Anexo B – Projeto das misturas

RP 06074 - Traço 2 FAIXA "C" DNER ES-390/99 EMULSÃO RL-1C CONVENCIONAL
31 de outubro de 2006

1- IDENTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

	TIPO	PROCEDÊNCIA	NATUREZA
A	Brita 1	Pedreira Sargon	Granito
B	Pedrisco	Pedreira Sargon	Granito
C	Pó de pedra	Pedreira Sargon	Granito
D	Cal	-	Cal CH-1

2 - ENSAIO SOBRE OS AGREGADOS

2.1 - Granulometria dos materiais individuais, combinados e Faixa Adotada (DNER-ME 083/98)

Peneiras	A	B	C	D	Mistura	Faixa "C" DNER 390/99	Faixa de Trabalho
1"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
3/4"	98,4	100.0	100.0	100.0	99,4	95 - 100	95 - 100
1/2"	30.0	100.0	100.0	100.0	72.0	-	65 - 79
3/8"	10,4	100.0	100.0	100.0	64,2	40 - 70	57 - 70
4	1,0	32,2	99,3	100.0	30,5	20 - 40	25 - 35
10	0,9	12,3	70.0	100.0	17,3	10 - 25	12 - 22
40	0,8	3,1	37,4	100.0	8,3	-	10 - 13
80	0,7	1,7	25,0	98.0	5,7	-	8 - 9
200	0,8	1,6	14,6	95.0	4,0	0 - 8	2 - 6

2.2 - Composição da mistura e massas específicas

Agregado	%	Massa específica (g/cm ³) - DNER ME 195/97		
		Seca	Saturada	Efetiva
Brita 1	40	2,705	2,665	2,685
Pedrisco	44	2,703	2,654	2,679
Pó de pedra	15	2,722	-	2,722
Cal	1	2,432	-	2,432

2.3 - Equivalente de Areia - DNER ME 054/97

Material	Brita 1	Pedrisco	Pó de pedra	Cal
E A	-	-	80%	-

2.4 - Adesividade do Agregado Graúdo

Método	RL - 1C
DNER-ME 78/94	Satisfatória

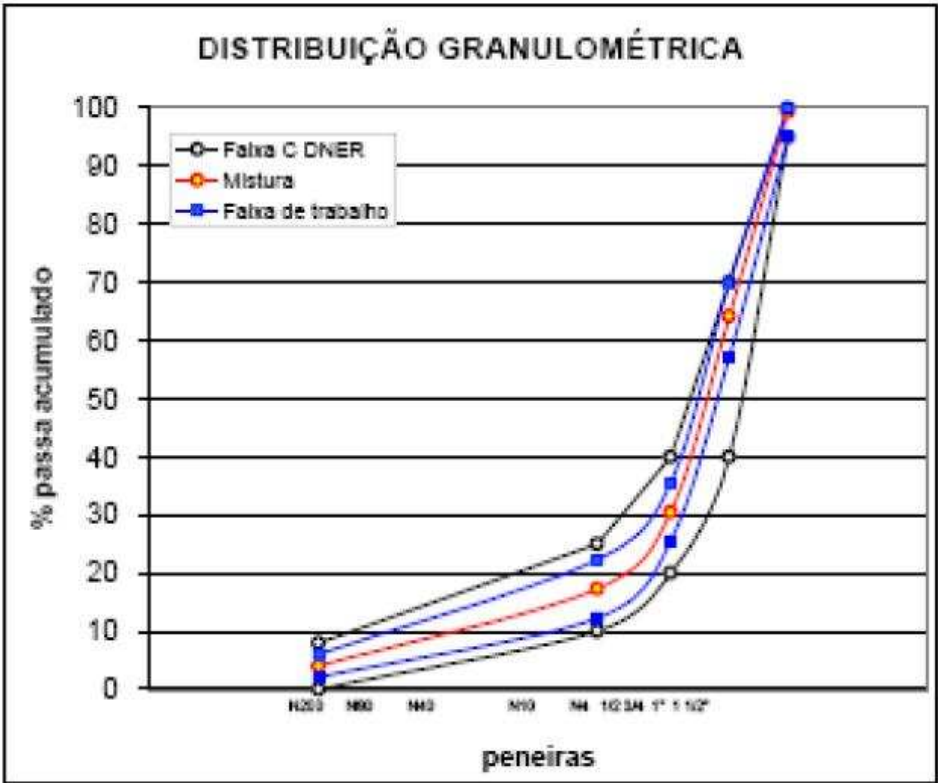
2.5 - Desgaste de Agregado por Abrasão (Los Angeles)

Material	Graduação	Método	Especificado	Resultado
Brita 1	B	DNER-ME 035/98	máx. 40%	26%

2.6 - Absorção de água e FAA - DNER-ME 195/97, ASTM C-128 e ASTM C 1252

Material	Brita 1	Pedrisco	Pó de pedra	Cal
Absorção	0,55%	0,68	-	-

RELATÓRIO DO DEPARTAMENTO TÉCNICO



RODOVIA

TESE DE MESTRADO- Josué

CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS MARSHALL

TRAÇO 3

RP 06074 - Traço DNER-ME 390/99 Emulsão RL-1C Convencional

		MATERIAL	% AG.	Massa esp. Efetiva
DENSIDADE REAL DO CAP 50/70		BRITA 1	5	2,685
DENSIDADE REAL DA MISTURA DO AGREGADO		PEDRISCO	49	2,679
d agr =		PÓ DE PEDRA	45	2,722
		CAL	1	2,432
			100	

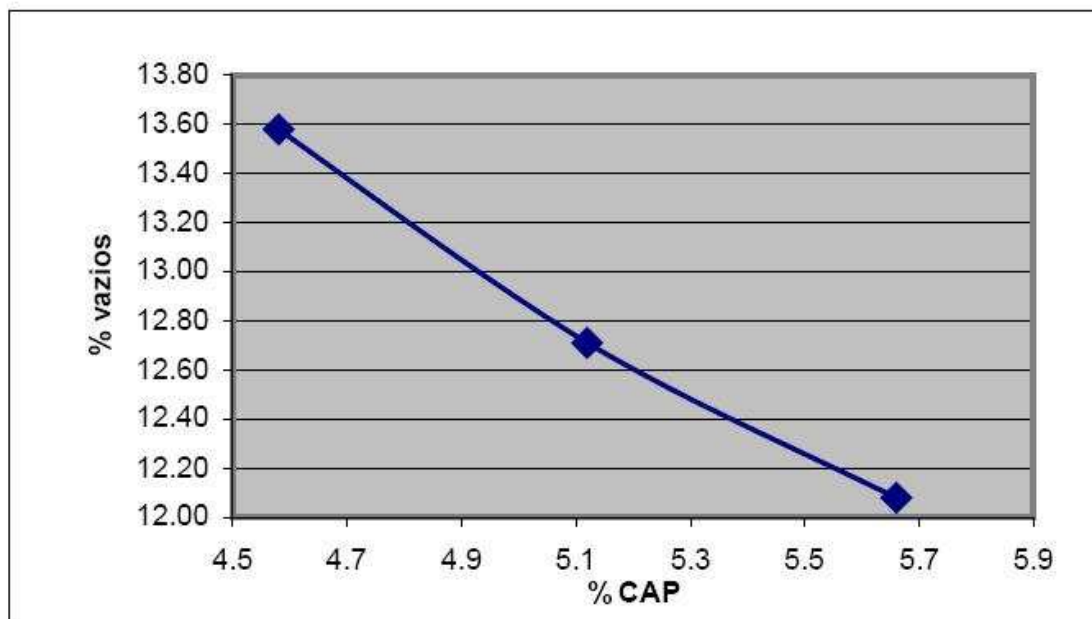
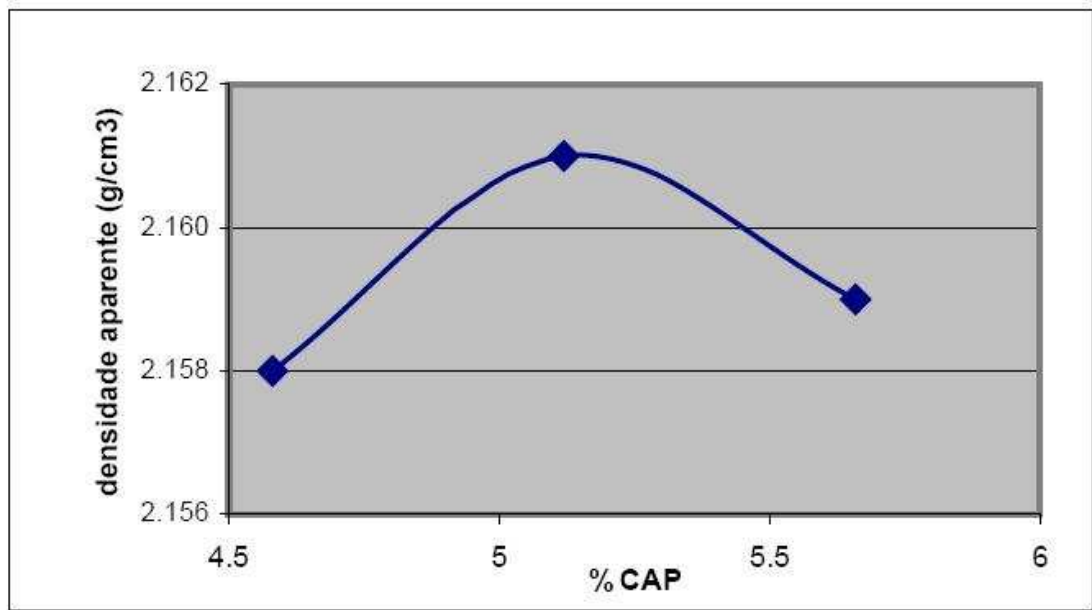
		100	
		% agr A + dr agr A	% agr B + dr agr B
		% agr C + dr agr C	% cal dr cal

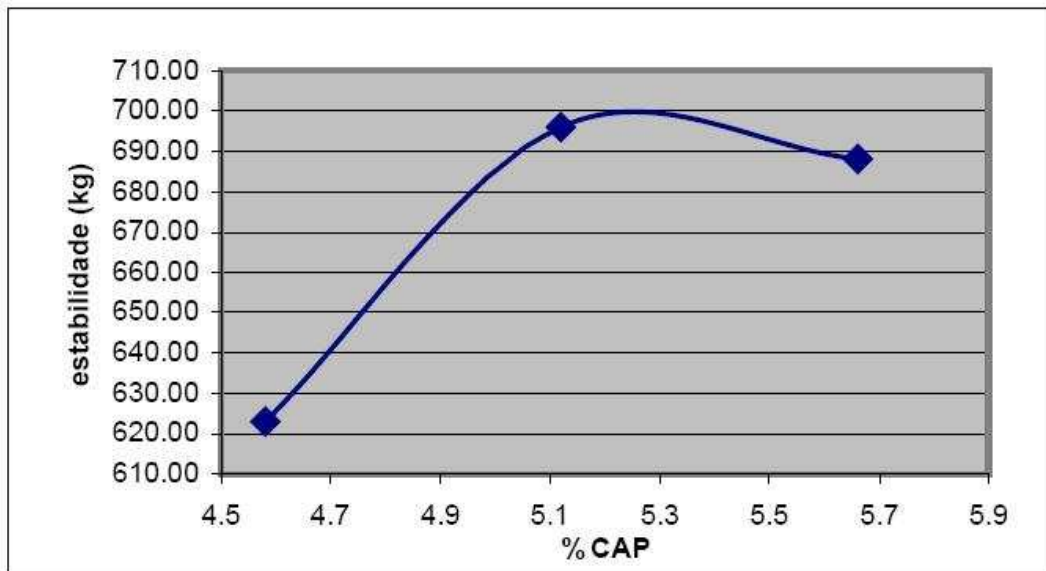
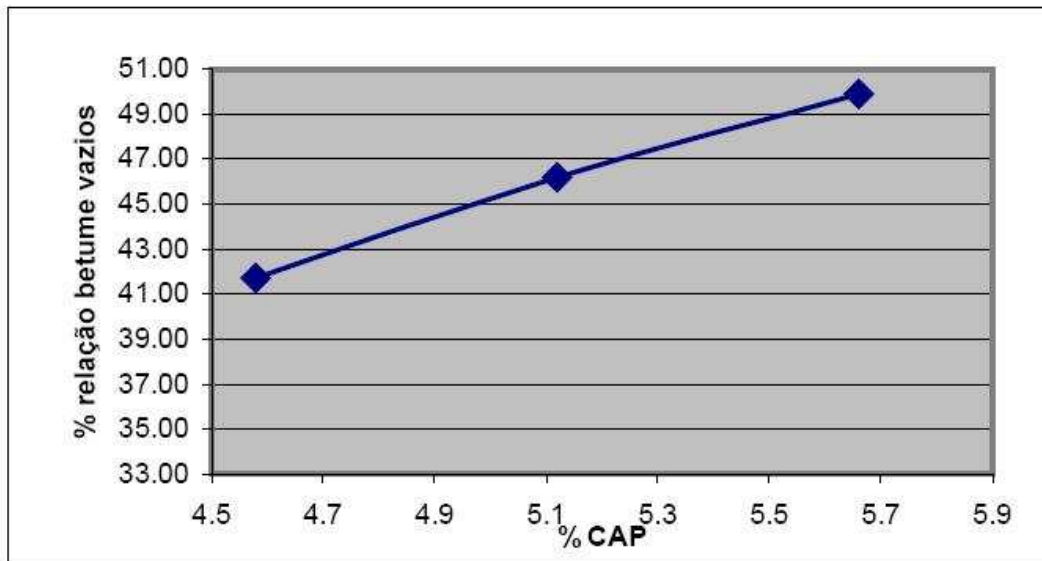
TRAÇO	% CAP p/ Mistura	DENSIDADES			V _v Vazios	V.C.B. Vazios Cheios	V. A. M. Vazios do Ag.	RBV Rel. Bet./Vazios	Estabilidade Corrigido
		Aparente	Teórica	RICE (g/cm³) ASTM D 2041					
teor	%	g/cm³	g/cm³		%V	%VCB	% VAM	% RBV	(kg)
4.8	4.58	2.158	2.497	-	13.58	9.74	23.32	41.75	623.00
5.4	5.12	2.161	2.476	-	12.71	10.91	23.62	46.19	696.00
6.0	5.66	2.159	2.456	-	12.08	12.04	24.12	49.92	688.00

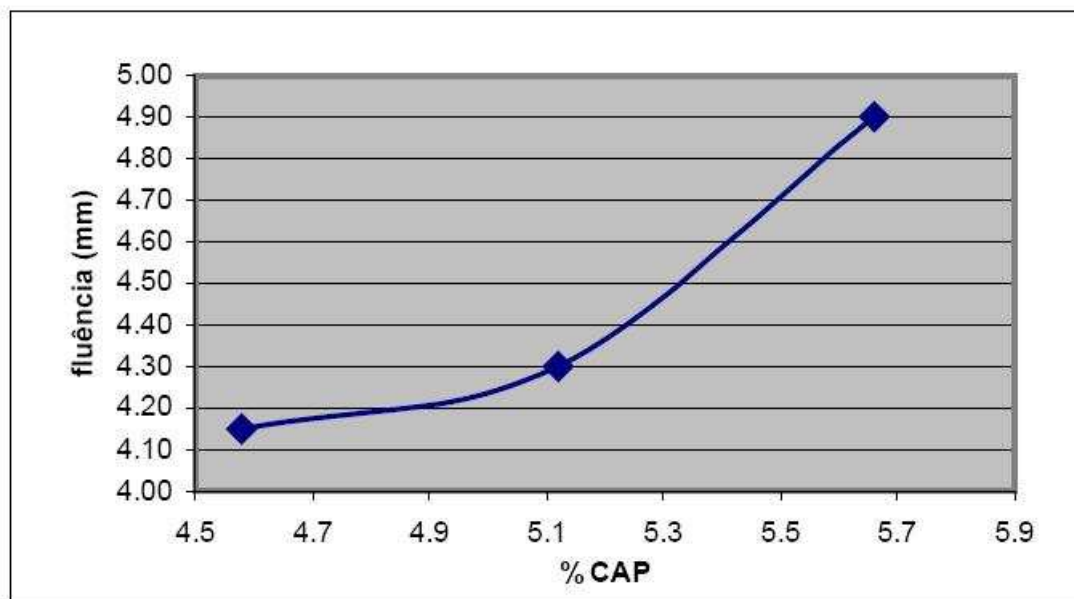
CARACTERÍSTICAS DO TRAÇO INDICADO

TEOR ÓTIMO DE RL - 1C CONVENCIONAL = 9,0 + / - 0,5 %

RESTÊNCIA A TRAÇÃO (kgf/cm²)	1,7
ESTABILIDADE (kgf)	699
FLUÊNCIA (mm)	4,3
VAZIOS TOTAIS (%)	12
RELAÇÃO BETUME VAZIOS (%)	46
DENSIDADE APARENTE DO CP (g/cm³)	2,1
EMERGIA DE COMPACTAÇÃO	75 golpes
TEMPERATURA DE ROMPIMENTO DO CP	40°
TEMPERATURA DE MOLDAGEM DO CP	Ambi







TRAÇO 2**PMF DENSO****FAIXA "C" DNER ES 390/99****PROJETO DE MISTURA ASFÁLTICA****RESUMO DO PROJETO**

COMPOSIÇÃO DA MISTURA		SECA
ORIGEM DO MATERIAL	MATERIAL	(%)
Pedreira Sargon	BRITA 1	40.0
Pedreira Sargon	PEDRISCO	44.0
Pedreira Sargon	PO DE PEDRA	15.0
	CAL	1,0
	TOTAL	100.0

GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS

Peneiras	Brita 1	Pedrisco	Pó	Cal	Mistura	Faixa "C" DNER 390/99	Faixa de Trabalho
1"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
3/4"	98,4	100.0	100.0	100.0	99,4	95 - 100	95 - 100
1/2"	30.0	100.0	100.0	100.0	72,0	-	65 - 79
3/8"	10,4	100.0	100.0	100.0	64,2	40 - 70	57 - 70
4	1,0	32,2	99,3	100.0	30,5	20 - 40	25 - 35
10	0,9	12,3	70.0	100.0	17,3	10 - 25	12 - 22
40	0,8	3,1	37,4	100.0	8,3	-	10 - 13
80	0,7	1,7	25.0	98.0	5,7	-	8 - 9
200	0,8	1,6	14,6	95.0	4,0	0 - 8	2 - 6

CARACTERÍSTICAS DA MISTURA FAIXA "C" (DNER-ES 390/99)			
		MINIMO	MAXIMO
TEOR ÓTIMO DE RL-1C Sobre os agregados	9,00 %	8,50	9,50
TEOR ÓTIMO DE 50/70 Sobre os agregados	5,40 %	5,10	5,70
TEOR ÓTIMO DE 50/70 Sobre mistura	5,12 %	4,85	5,40
MASSA ESPECÍFICA DO ASFALTO	1,015 g/cm3	-	-
DENSIDADE REAL TEÓRICA DA MISTURA	2,476 g/cm3	-	-
DENSIDADE APARENTE DO CP - ASTM D 2726	2,161 g/cm3	-	-
TEOR DE VAZIOS (%Vv)	12,71 %	5%	30%
RELAÇÃO BETUME/VAZIOS (%RBV)	49,19 %	-	-
RESISTENCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	1,78 kg/cm2	-	-
ESTABILIDADE MARSHALL	696 kgf	250 kgf	
FLUÊNCIA	4,30 mm	2,0	4,5
DESGASTE DE AGREGADO POR ABRASÃO LOS ANGELES	-	-	40%
EQUIVALENTE DE AREIA	80%	55%	-

RP 06074 - Traço 4 FAIXA "C" DNER ES-390/99 EMULSÃO RL-C MODIFICADA - FLEX
31 de outubro de 2006

1- IDENTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

TIPO		PROCEDÊNCIA	NATUREZA
A	Brita 1	Pedreira Sargon	Granito
B	Pedrisco	Pedreira Sargon	Granito
C	Pó de pedra	Pedreira Sargon	Granito
D	Cal	-	Cal CH-1

2 - ENSAIO SOBRE OS AGREGADOS

2.1 - Granulometria dos materiais individuais, combinados e Faixa Adotada (DNER-ME 083/98)

Peneiras	A	B	C	D	Mistura	Faixa "C" DNER 390/99	Faixa de Trabalho
1"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100
3/4"	98,4	100.0	100.0	100.0	99,4	95 - 100	95 - 100
1/2"	30.0	100.0	100.0	100.0	72,0	-	65 - 79
3/8"	10,4	100.0	100.0	100.0	64,2	40 - 70	57 - 70
4	1,0	32,2	99,3	100.0	30,5	20 - 40	25 - 35
10	0,9	12,3	70.0	100.0	17,3	10 - 25	12 - 22
40	0,8	3,1	37,4	100.0	8,3	-	10 - 13
80	0,7	1,7	25.0	98.0	5,7	-	8 - 9
200	0,8	1,6	14,6	95.0	4,0	0 - 8	2 - 6

2.2 - Composição da mistura e massas específicas

		Massa específica (g/cm ³) - DNER ME 195/97		
Agregado	%	Seca	Saturada	Efetiva
Brita 1	40	2,705	2,665	2,685
Pedrisco	44	2,703	2,654	2,679
Pó de pedra	15	2,722	-	2,722
Cal	1	2,432	-	2,432

2.3 - Equivalente de Areia - DNER ME 054/97

Material	Brita 1	Pedrisco	Pó de pedra	Cal
E A	-	-	80%	-

2.4 - Adesividade do Agregado Graúdo

Método	RL - C FLEX
DNER-ME 78/94	Satisfatória

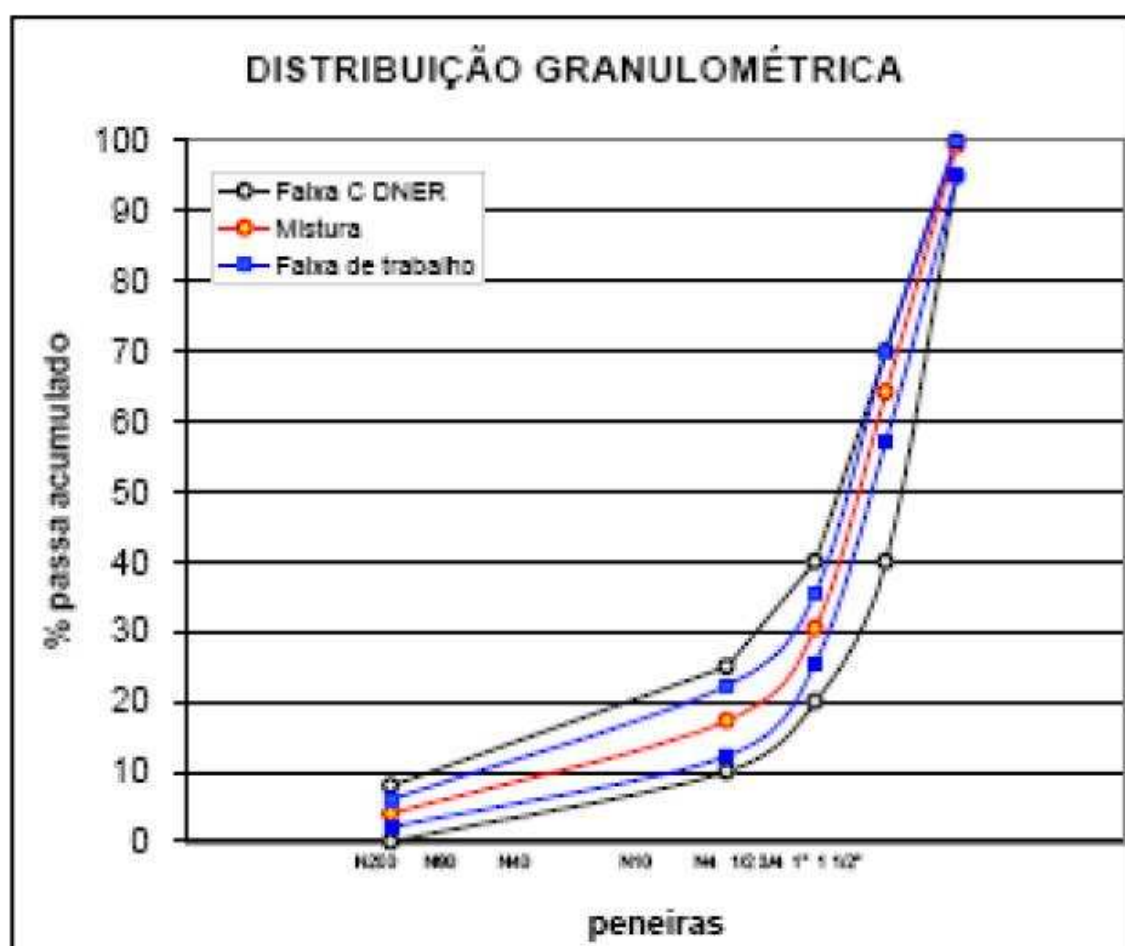
2.5 - Desgaste de Agregado por Abrasão (Los Angeles)

Material	Graduação	Método	Especificado	Resultado
Brita 1	B	DNER-ME 035/98	máx. 40%	26%

2.6 - Absorção de água e FAA - DNER-ME 195/97, ASTM C-128 e ASTM C 1252

Material	Brita 1	Pedrisco	Pó de pedra	Cal
Absorção	0,55%	0,68	-	-

RELATÓRIO DO DEPARTAMENTO TÉCNICO

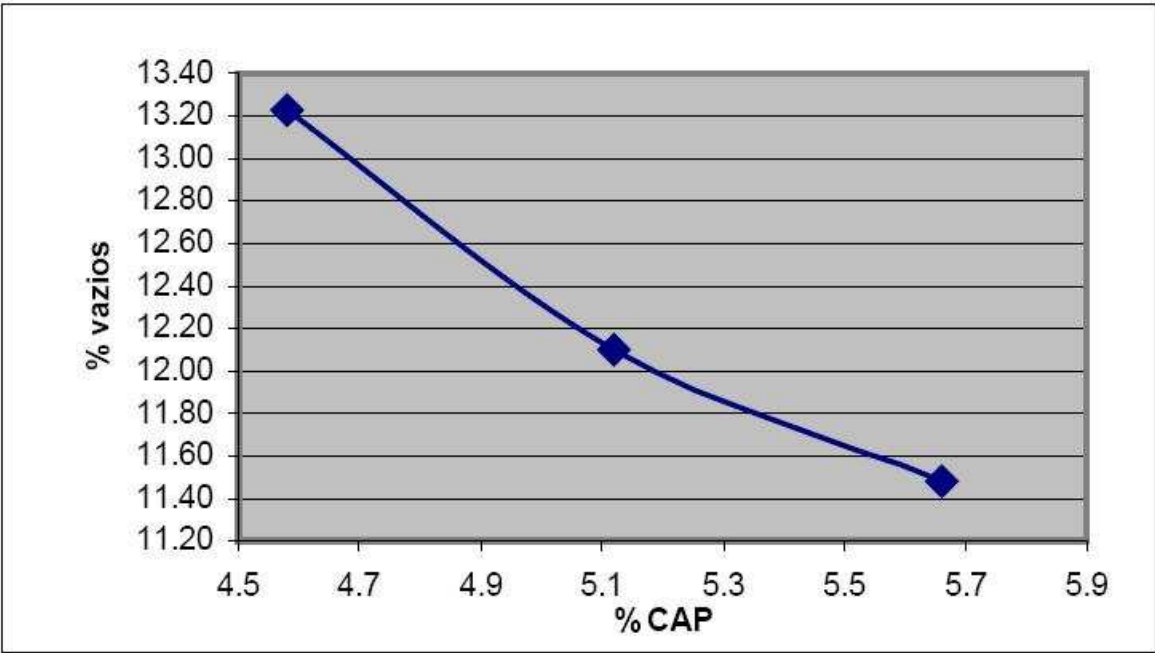
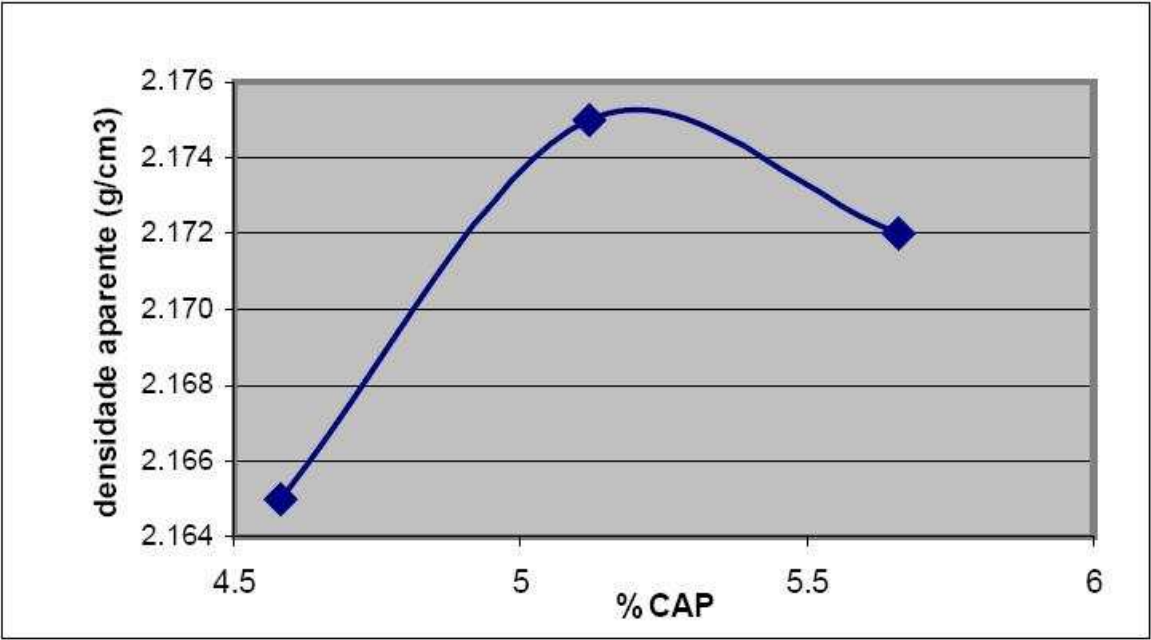


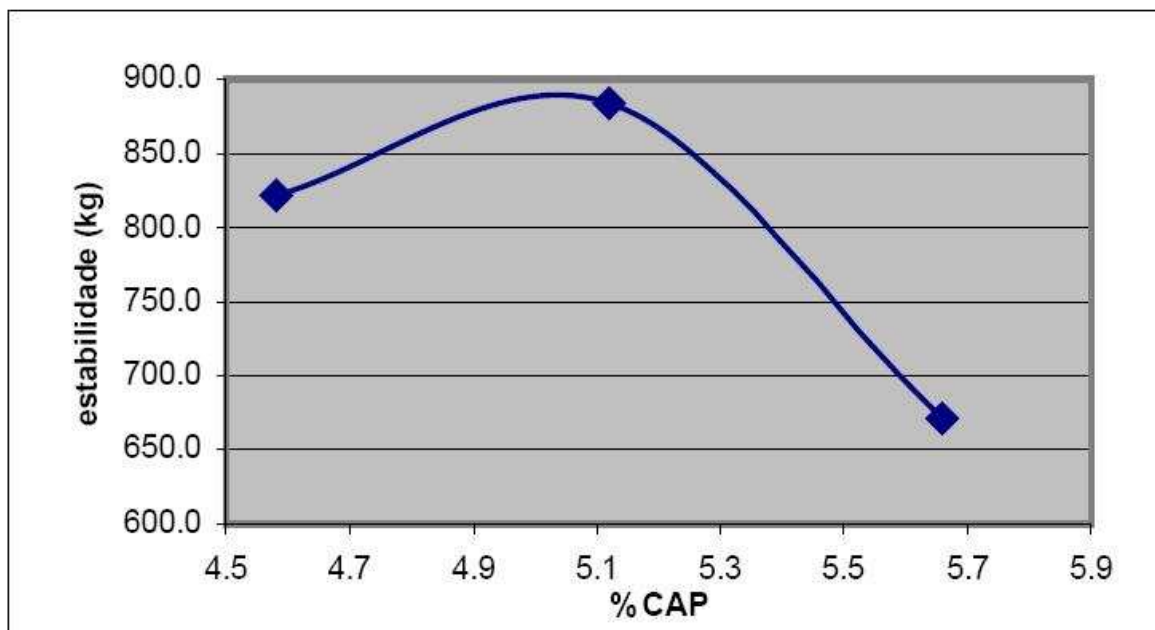
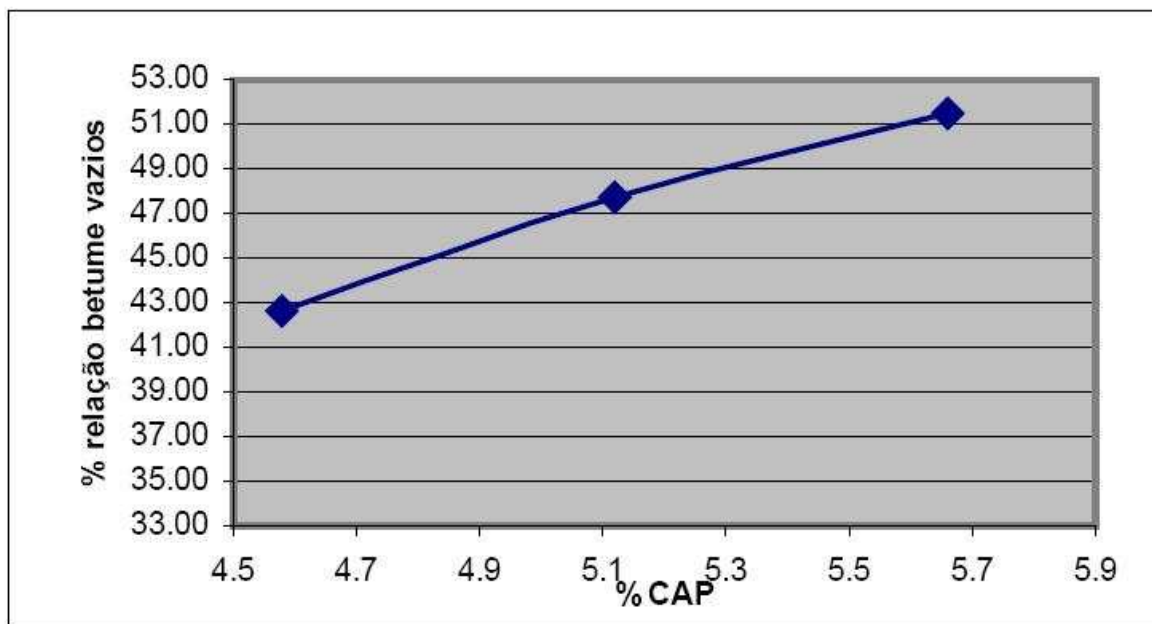
CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS MARSHALL		
RODOVIA	TRAÇO 3	
TESE DE MESTRADO- Josué	RP 06074 - Traço DNER-ME 385/99 Emulsão RL-C Modificada - FLEX	

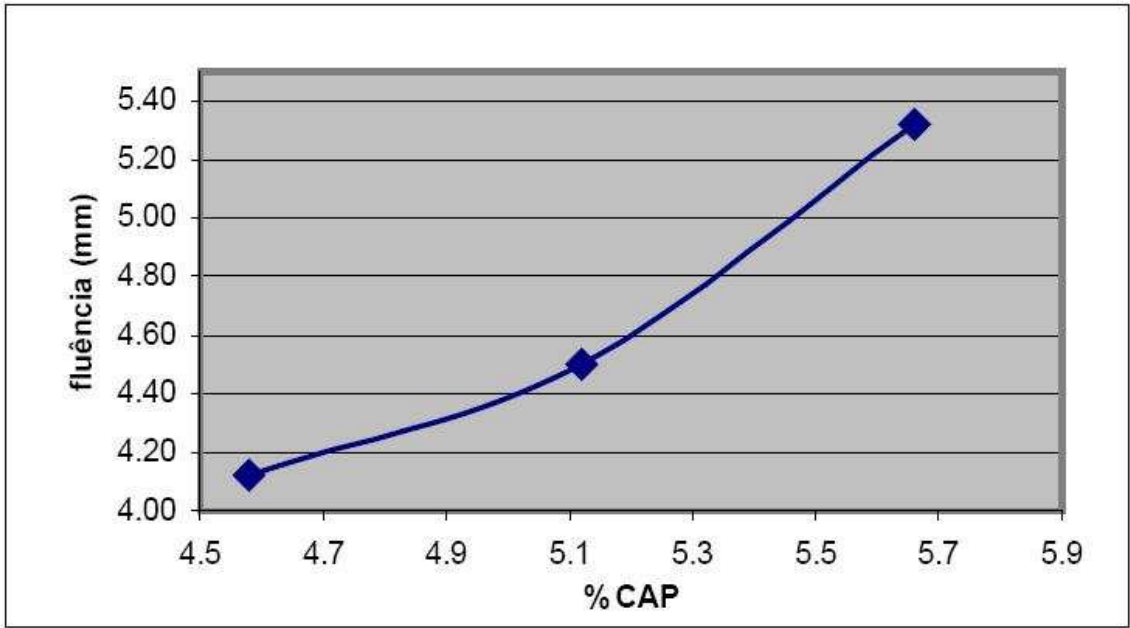
				MATERIAL	% AG.	Massa esp. Eletiva
DENSIDADE REAL DO CAP 50/70				BRITA 1	5	2,685
DENSIDADE REAL DA MISTURA DO AGREGADO				PEDRISCO	49	2,679
d agr =				PÓ DE PEDRA	45	2,722
				CAL	1	2,432
					100	

TRAÇO	% CAP p/ Mistura	DENSIDADES			Vv Vazios	V.C.B. Vazios Cheios	V. A. .M. Vazios do Ag.	RBV Rel. Bet./Vazios	Estabilid. Corrigid (kg)
		Aparente	Teórica	RICE (g/cm3)					
teor	%	g/cm³	g/cm³	ASTM D 2041	%V	%VCB	% VAM	% RBV	
4.8	4.58	2.165	2.495	-	13.23	9.83	23.06	42.62	822.0
5.4	5.12	2.175	2.474	-	12.10	11.04	23.13	47.75	884.0
6.0	5.66	2.172	2.454	-	11.48	12.19	23.67	51.49	671.0

CARACTERÍSTICAS DO TRAÇO INDICADO	
TEOR ÓTIMO DE RL - 1C MODIFICADA - FLEX = 9,0 + / - 0,5 %	
RESTÊNCIA A TRAÇÃO (kgf/cm²)	
ESTABILIDADE (kgf)	
FLUÊNCIA (mm)	
VAZIOS TOTAIS (%)	
RELAÇÃO BETUME VAZIOS (%)	
DENSIDADE APARENTE DO CP (g/cm³)	
EMERGIA DE COMPACTAÇÃO	75
TEMPERATURA DE ROMPIMENTO DO CP	
TEMPERATURA DE MOLDAGEM DO CP	







TRAÇO 4**PMF DENSO****FAIXA "C" DNER ES 390/99****PROJETO DE MISTURA ASFÁLTICA****RESUMO DO PROJETO**

COMPOSIÇÃO DA MISTURA		SECA
ORIGEM DO MATERIAL	MATERIAL	(%)
Pedreira Sargon	BRITA 1	40.0
Pedreira Sargon	PEDRISCO	44.0
Pedreira Sargon	PO DE PEDRA	15.0
	CAL	1.0
	TOTAL	100.0

GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS

Peneiras	Brita 1	Pedrisco	Pó	Cal	Mistura	Faixa "C" DNER 390/99	Faixa de Trabalho
1"	100	100	100	100	100	100	100
3/4"	98,4	100	100	100	99,4	95 - 100	95 - 100
1/2"	30	100	100	100	72,0	-	65 - 79
3/8"	10,4	100	100	100	64,2	40 - 70	57 - 70
4	1,0	32,2	99,3	100	30,5	20 - 40	25 - 35
10	0,9	12,3	70	100	17,3	10 - 25	12 - 22
40	0,8	3,1	37,4	100	8,3	-	10 - 13
80	0,7	1,7	25	98	5,7	-	8 - 9
200	0,8	1,6	14,6	95	4,0	0 - 8	2 - 6

CARACTERÍSTICAS DA MISTURA FAIXA "C" (DNER-ES 390/99)			
		MINIMO	MAXIMO
TEOR ÓTIMO DE RL-C flex Sobre os agregados	9,00 %	8,50	9,50
TEOR ÓTIMO DE 50/70 Sobre os agregados	5,40 %	5,10	5,70
TEOR ÓTIMO DE 50/70 Sobre mistura	5,12 %	4,85	5,40
MASSA ESPECÍFICA DO ASFALTO	1,090 g/cm3	-	-
DENSIDADE REAL TEÓRICA DA MISTURA	2,474 g/cm3	-	-
DENSIDADE APARENTE DO CP - ASTM D 2726	2,175 g/cm3	-	-
TEOR DE VAZIOS (%Vv)	12,10 %	5%	30%
RELAÇÃO BETUME/VAZIOS (%RBV)	47,75 %	-	-
RESISTENCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	2,26 kg/cm2	-	-
ESTABILIDADE MARSHALL	884 kgf	250 kgf	
FLUÊNCIA	4,50 mm	2,0	4,5
DESGASTE DE AGREGADO POR ABRASÃO LOS ANGELES	-	-	40%
EQUIVALENTE DE AREIA	80%	55%	-

Apêndice A – Telas do software WFLAPS

WFLAPS

Número de camadas de pavimento: 2

Número de pontos extras a serem analisados: 0

Carga de eixo: 13 tf

Pressão de inflação dos pneus: 5 kgf/cm²

Tipo de Eixo: Eixo Simples Roda Simples

Continua >>

1ª camada

Tipo de material: Asfáltico

Espessura da camada: 7 cm

Coefficiente de Poisson (n): 0,33

Ângulo de atrito f (graus): 45

Coesão (c): 35

Número de divisões da camada: 5

Peso específico (g): 0,02476 kgf/cm³

Método de cálculo do módulo de resiliência: Linear

Módulo de Young (E): 7214000000 N/m²

$M_R = E$

<< Volta Continua >>

WFLAPS

2ª camada

Tipo de material: Granular

Espessura da camada: 20 cm

Coefficiente de Poisson (n): 0,35

Ângulo de atrito f (graus): 35

Coesão (c): 0

Número de divisões da camada: 5

Peso específico (g): 0,0018 kgf/cm³

Método de cálculo do módulo de resiliência: Linear

Módulo de Young (E): 2000000000 N/m²

$M_R = E$

<< Volta Continua >>

WFLAPS

Subleito

Tipo de material: Solo

Espessura da camada: 1000 cm

Coefficiente de Poisson (n): 0,40

Ângulo de atrito f (graus): 30

Coesão (c): 1

Número de divisões da camada: 10

Peso específico (g): 0,0018 kgf/cm³

Método de cálculo do módulo de resiliência: Linear

Módulo de Young (E): 1200000000 N/m²

$M_R = E$

<< Volta Continua >>

WFLAPS

Número de camadas de pavimento

2

Número de pontos extras a serem analisados

0

Carga de eixo

46,5

tf

Pressão de inflação dos pneus

11,5

kgf/cm²

Tipo de Eixo

Eixo Simples Roda Simples

Continua >>

WFLAPS

1ª camada

Tipo de material

Asfáltico

Espessura da camada

7

cm

Coeficiente de Poisson (n)

0,33

Ângulo de atrito f (graus)

45

Coesão (c)

35

Número de divisões da camada

5

Peso específico (g)

0,02474

kgf/cm³

Método de cálculo do módulo de resiliência

Linear

Módulo de Young (E)

2757360000

N/m²

$M_R = E$

<< Volta

Continua >>

WFLAPS

2ª camada

Tipo de material

Granular

Espessura da camada

20

cm

Coeficiente de Poisson (n)

0,35

Ângulo de atrito f (graus)

35

Coesão (c)

0

Número de divisões da camada

5

Peso específico (g)

0,0018

kgf/cm³

Método de cálculo do módulo de resiliência

Linear

Módulo de Young (E)

2000000000

N/m²

$M_R = E$

<< Volta

Continua >>

WFLAPS

Subleito

Tipo de material

Solo

Espessura da camada

1000

cm

Coeficiente de Poisson (n)

0,40

Ângulo de atrito f (graus)

30

Coesão (c)

1

Número de divisões da camada

10

Peso específico (g)

0,0018

kgf/cm³

Método de cálculo do módulo de resiliência

Linear

Módulo de Young (E)

12000000000

N/m²

$M_R = E$

<< Volta

Continua >>

WFLAPS

Número de camadas de pavimento

2

Número de pontos extras a serem analisados

0

Carga de eixo

80

tf

Pressão de inflação dos pneus

18

kgf/cm²

Tipo de Eixo

Eixo Simples Roda Simples

Continua >>

1ª camada

Tipo de material

Asfáltico

Espessura da camada

7

cm

Coeficiente de Poisson (n)

0,33

Ângulo de atrito f (graus)

45

Coesão (c)

35

Número de divisões da camada

5

Peso específico (g)

0,0025

kgf/cm³

Método de cálculo do módulo de resiliência

Linear

Módulo de Young (E)

5925150000

N/m²

$M_R = E$

<< Volta

Continua >>

WFLAPS

2ª camada

Tipo de material

Granular

Espessura da camada

20

cm

Coeficiente de Poisson (n)

0,35

Ângulo de atrito f (graus)

35

Coesão (c)

0

Número de divisões da camada

5

Peso específico (g)

0,0018

kgf/cm³

Método de cálculo do módulo de resiliência

Linear

Módulo de Young (E)

2000000000

N/m²

$M_R = E$

<< Volta

Continua >>

WFLAPS

Subleito

Tipo de material

Solo

Espessura da camada

1000

cm

Coeficiente de Poisson (n)

0,40

Ângulo de atrito f (graus)

30

Coesão (c)

1

Número de divisões da camada

10

Peso específico (g)

0,0018

kgf/cm³

Método de cálculo do módulo de resiliência

Linear

Módulo de Young (E)

12000000000

N/m²

$M_R = E$

<< Volta

Continua >>

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 18 de novembro de 2009	3. REGISTRO Nº CTA/ITA/TC-139/2009	4. Nº DE PÁGINAS 104
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Análise da Viabilidade do Uso de Pré-Misturados a Frio em Aeródromos			
6. AUTOR: Bruno Cardoso Vieira			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Análise de Viabilidade. 2. PMF. 3. Pré-Misturado a Frio. 4. COMARA. 5. Aeródromos. 6. Revestimento. 7. Pista de pouso e decolagem.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Análise de viabilidade; Pavimentação; Asfaltos; Misturas (processo); Aeroportos; Revestimentos; Pistas (de pouso e decolagem); Engenharia civil; Engenharia aeronáutica			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional () Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Régis Martins Rodrigues (ITA); co-orientador: Cap Eng Frank Cabral de Amaral (COMARA). Publicado em 2009.			
11. RESUMO: O presente trabalho de graduação tem por objetivo realizar a análise de viabilidade da utilização de misturas asfálticas pré-misturadas a frio como solução em revestimentos de pistas de pouso e decolagem da região amazônica. O procedimento de análise baseia-se em: (1) um estudo comparativo entre o pré-misturado a frio (PMF) e o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), enumerando-se as principais vantagens e desvantagens de cada alternativa, (2) análise computacional, utilizando-se o software WFLAPS, para a observação da resistência ao trincamento por fadiga de três tipos de revestimentos dosados pelo método Marshall (PMF convencional, PMF modificado por polímero e CBUQ) e (3) um estudo de caso, baseado na experiência da COMARA no aeroporto de Jacareacanga-PA no ano de 1999, onde houve uma tentativa má sucedida de utilização do PMF como revestimento da pista de pouso e decolagem do aeródromo da localidade. Através da metodologia de análise apresentada, encontram-se resultados que confirmam a viabilidade de utilização do PMF modificado com polímero como revestimento em pistas de aeródromos da região amazônica.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			