



ESCOLA
POLITÉCNICA
DA USP

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

PTR 2388 – TRANSPORTE E MEIO AMBIENTE

**IMPACTOS SOCIAIS E AMBIENTAIS
DA IMPLANTAÇÃO DO MEIO DE
TRANSPORTE RODOVIÁRIO E
PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA**

01/ABR/2016



ESCOLA
POLITÉCNICA
DA USP

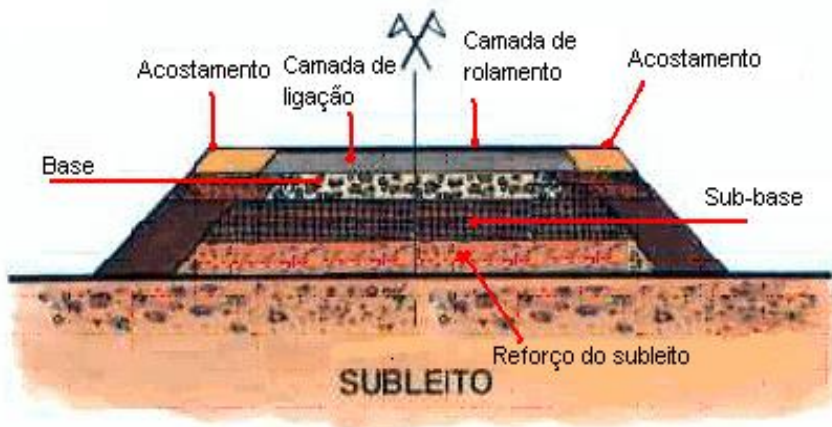
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ASFALTO-BORRACHA E MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Profa. Kamilla Vasconcelos

kamilla.vasconcelos@usp.br

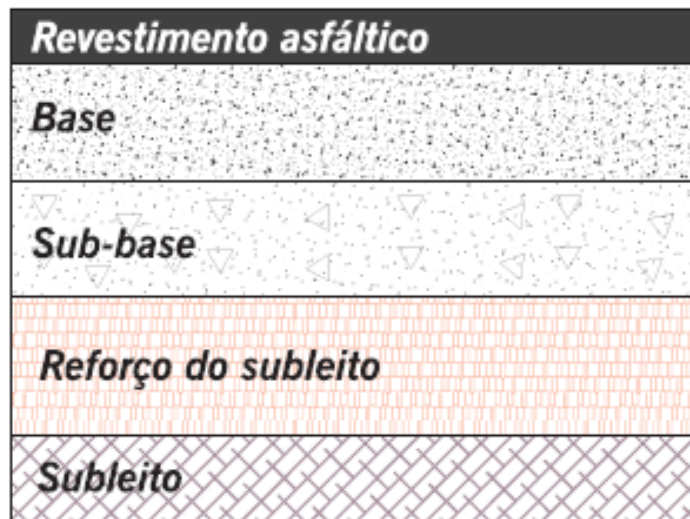
INTRODUÇÃO



- **ESTRUTURA** construída após a terraplenagem e destinada, econômica, em seu CONJUNTO, a:

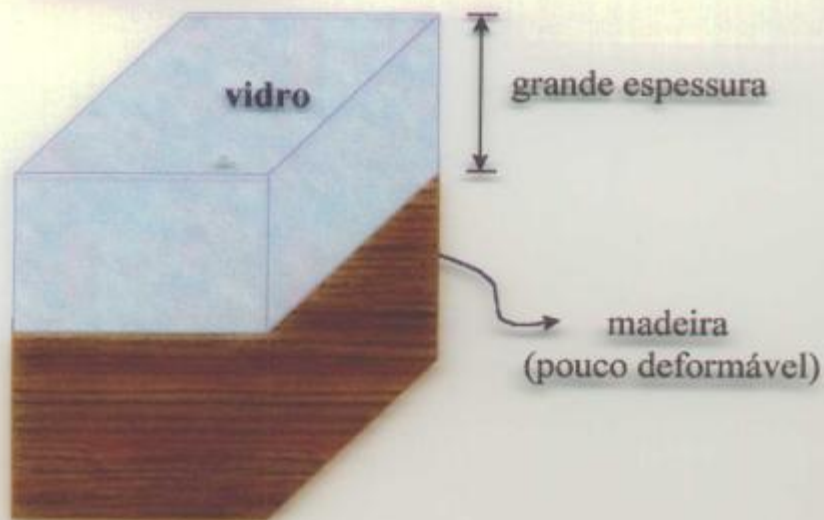
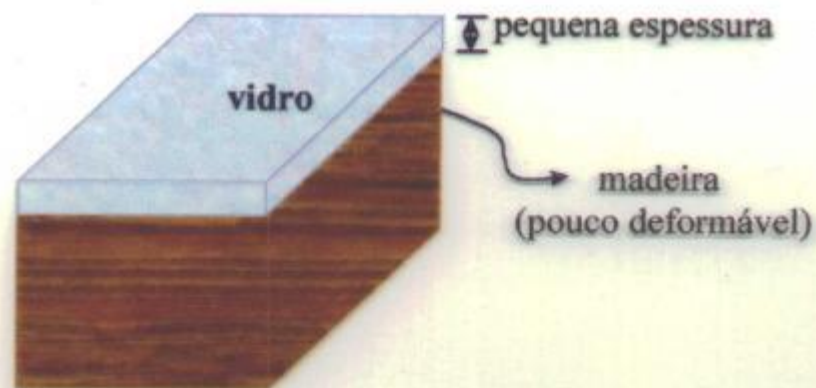
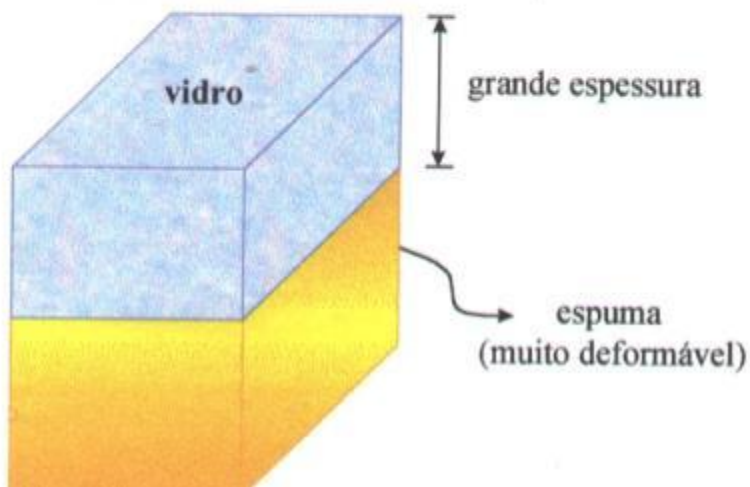
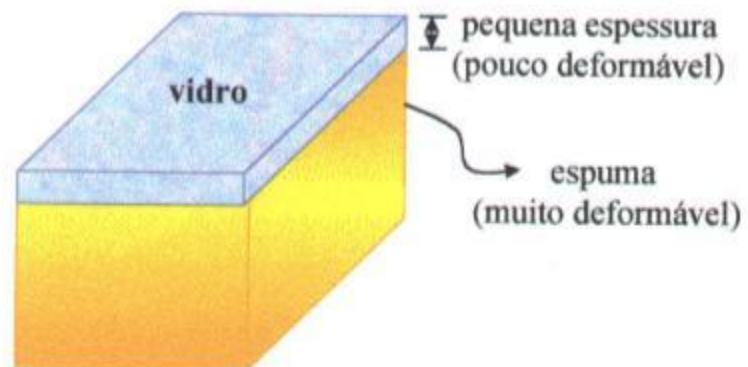
- ✓ **Resistir e distribuir** ao subleito os esforços **verticais** produzidos pelo tráfego;
- ✓ Melhorar as **condições de rolamento** quanto a comodidade e segurança;
- ✓ **Resistir aos esforços horizontais** que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

O COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DEPENDE DA **ESPESSURA DE CADA CAMADA**, DA **RIGIDEZ** DESSAS E DO SUBLEITO, BEM COMO DA **INTEREÇÃO ENTRE AS DIFERENTES CAMADAS DO PAVIMENTO**



Estrutura de Pavimento-tipo

COMPATIBILIZAÇÃO DE MATERIAIS

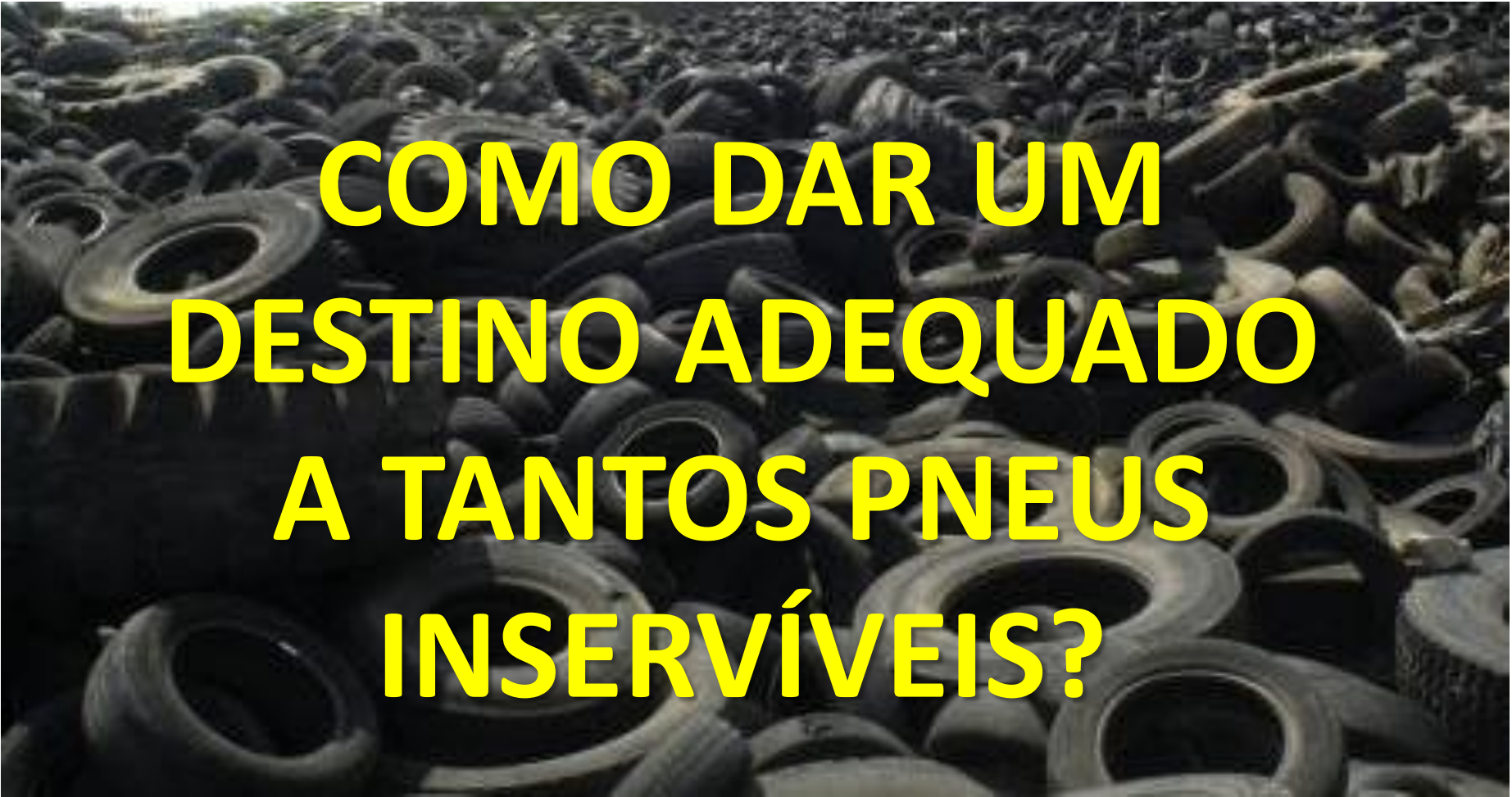


TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS NA PAVIMENTAÇÃO

- ✓ **ASFALTO-BORRACHA***
- ✓ **MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS***
- ✓ **PAVIMENTOS PERMEÁVEIS**
- ✓ **REDUÇÃO DE RUÍDO (PNEU/PAVIMENTO)**
- ✓ **RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO***
- ✓ **RECICLAGEM DE PAVIMENTOS***



ASFALTO-BORRACHA



**COMO DAR UM
DESTINO ADEQUADO
A TANTOS PNEUS
INSERVÍVEIS?**

CONAMA 258-99 (RESOLUÇÃO 26/08/99)

A PARTIR DE 01/01/2002: PARA CADA **QUATRO PNEUS NOVOS** FABRICADOS NO PAÍS OU PNEUS IMPORTADOS, INCLUSIVE AQUELES QUE ACOMPANHAM OS VEÍCULOS IMPORTADOS, AS EMPRESAS FABRICANTES E AS IMPORTADORAS DEVERÃO **DAR DESTINAÇÃO FINAL A UM PNEU INSERVÍVEL;**

A PARTIR DE 01/01/2003: PARA CADA **DOIS PNEUS NOVOS** FABRICADOS NO PAÍS OU PNEUS IMPORTADOS, ..., AS EMPRESAS FABRICANTES E AS IMPORTADORAS DEVERÃO **DAR DESTINAÇÃO FINAL A UM PNEU INSERVÍVEL.**



CONAMA 258-99 (RESOLUÇÃO 26/08/99)

a partir de 01/01/2004:

- a) para cada **UM pneu novo** fabricado no País ou pneu novo importado, ..., as empresas fabricantes e as importadoras deverão **dar destinação final a UM pneu inservível**;
- b) para cada **QUATRO pneus reformados** importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão **dar destinação final a CINCO pneus inservíveis**;

a partir de 01/01/2005:

- a) para cada **QUATRO pneus novos** fabricados no País ou pneus novos importados, ..., as empresas fabricantes e as importadoras deverão **dar destinação final a CINCO pneus inservíveis**;
- b) para cada **TRÊS pneus reformados** importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão **dar destinação final a QUATRO pneus inservíveis**.

PROCESSO ÚMIDO

- Partículas pequenas
- 15 a 20% em massa do ligante
- 1,5% em massa da mistura

PROCESSO SECO

- Partículas maiores em substituição de até 5% da massa de agregado

Pedaços sólidos de borracha são adicionados como substituição de no máximo 5% do agregado

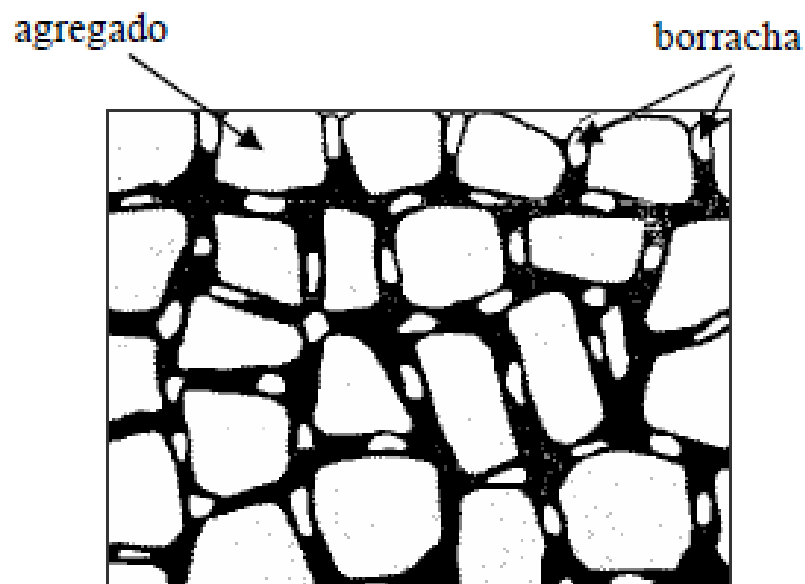
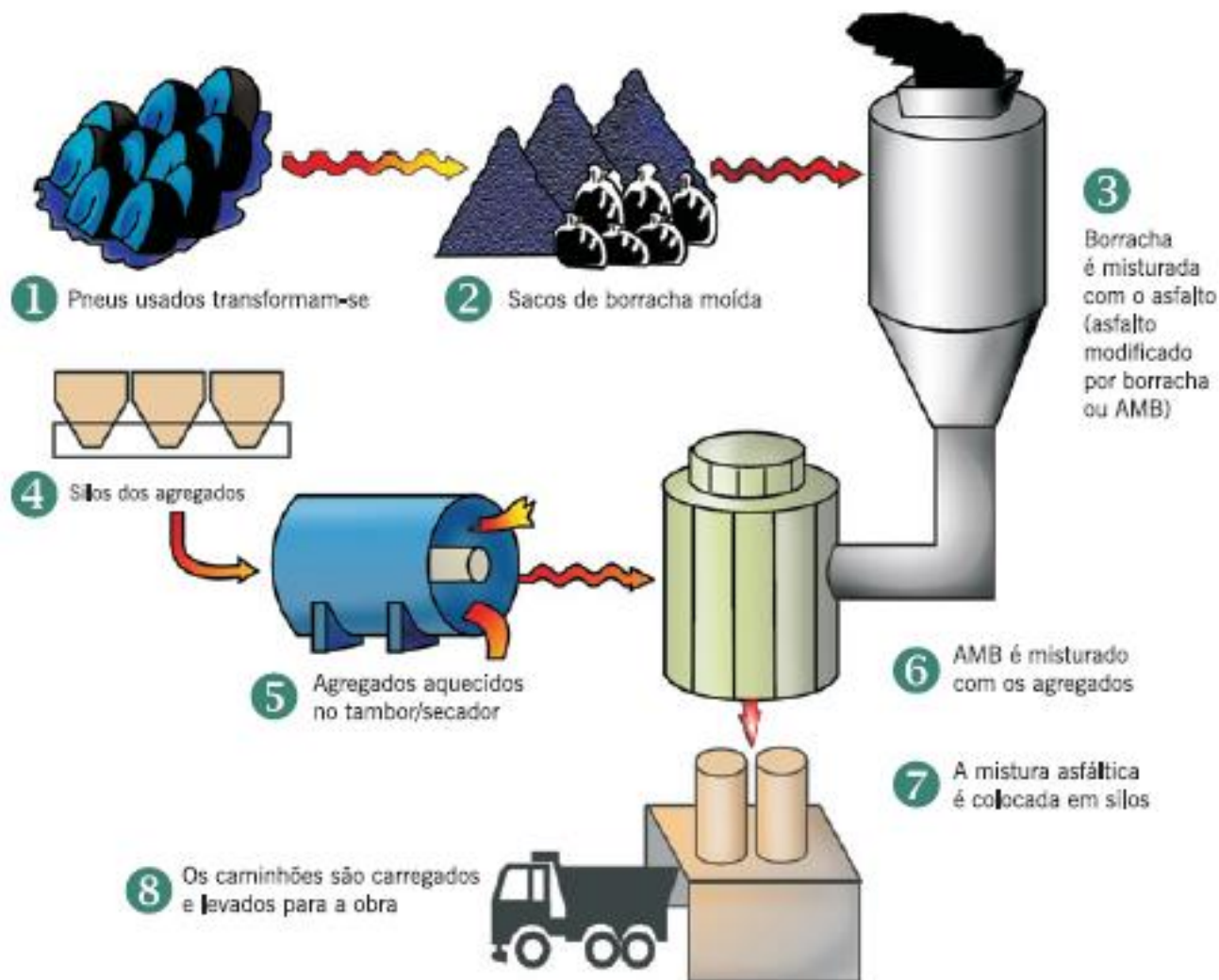


Ilustração de misturas com partículas sólidas de borracha (Takallou e Hicks, 1988)

PROCESSO ÚMIDO



Esquema de fabricação do asfalto-borracha via úmida pelo processo de mistura estocável (*terminal blending*)

PROCESSO ÚMIDO (PRODUÇÃO)

PNEUS INSERVÍVEIS SÃO COLETADOS PARA PROCESSAMENTO



PROCESSO ÚMIDO (PRODUÇÃO)

OS PNEUS SÃO MOÍDOS E GRANULADOS



PROCESSO ÚMIDO (PRODUÇÃO)

FIBRAS E AÇO SÃO REMOVIDOS



PROCESSO ÚMIDO (PRODUÇÃO)

NO GERAL, A BORRACHA TRITURADA QUE PASSA NA PENEIRA DE 2,00mm DE ABERTURA (LIVRE DA FERRAGEM E COM ATÉ 0,5% DE FIBRA) É UTILIZADA



PROCESSO ÚMIDO (PRODUÇÃO)

EQUIPAMENTOS PARA MISTURA DO ASFALTO-BORRACHA



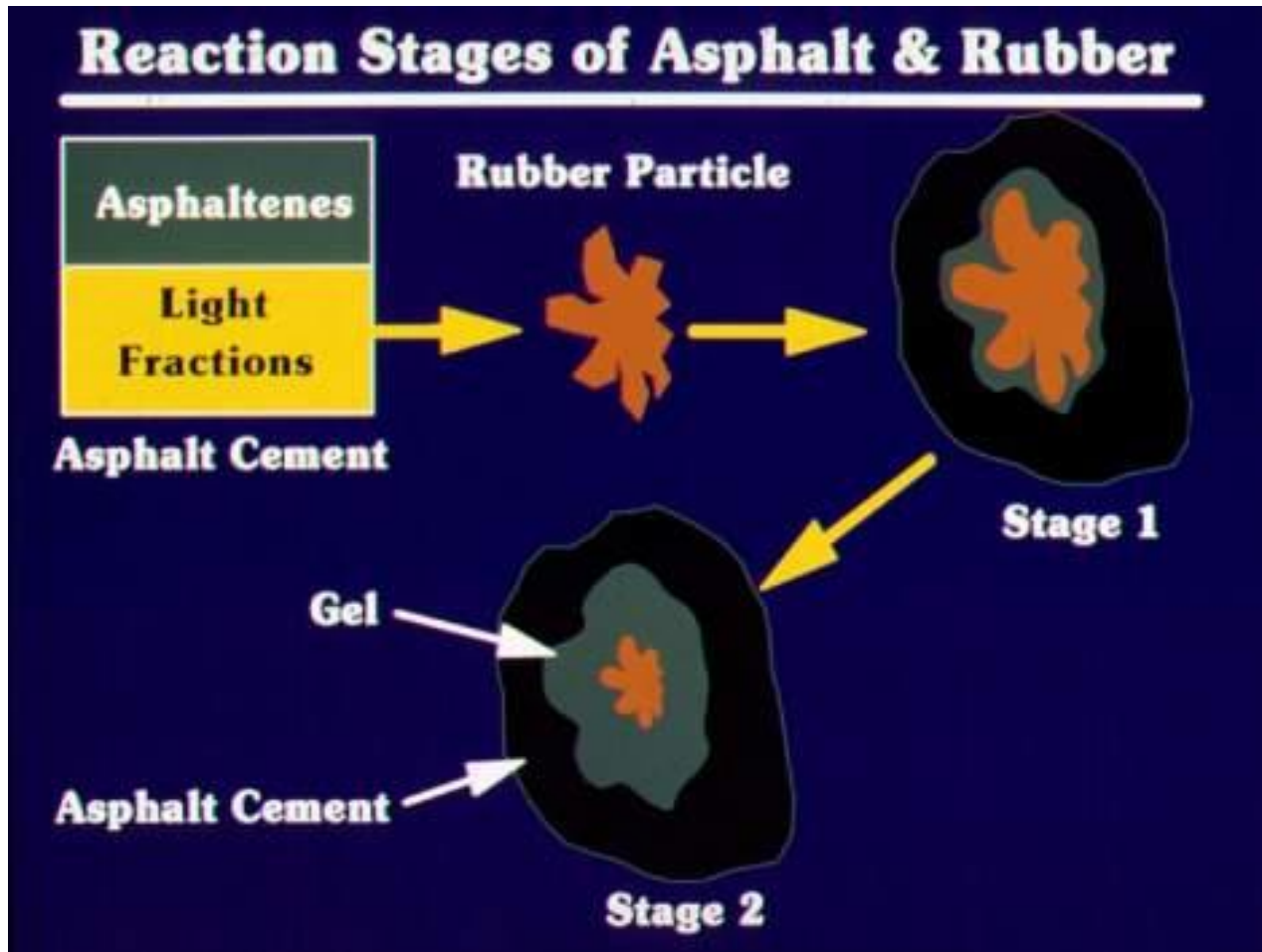
PROCESSO ÚMIDO (PRODUÇÃO)

CARREGAMENTO DA BORRACHA JÁ PROCESSADA



PROCESSO ÚMIDO (PRODUÇÃO)

AO ADICIONAR A BORRACHA AO LIGANTE ASFÁLTICO, A BORRACHA É CAPAZ DE ABSORVER E RETER OS ÓLEOS AROMÁTICOS DO ASFALTO



PROCESSO ÚMIDO (PRODUÇÃO)

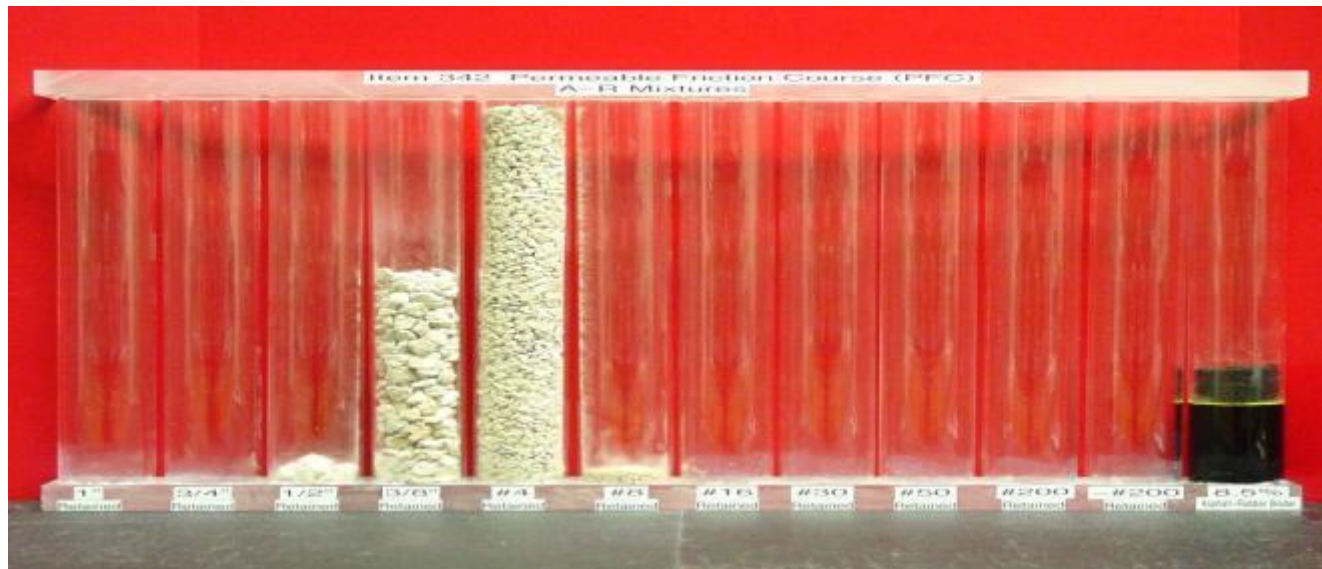
O ASFALTO-BORRACHA PODE SER UTILIZADO EM QUALQUER TIPO DE CLIMA



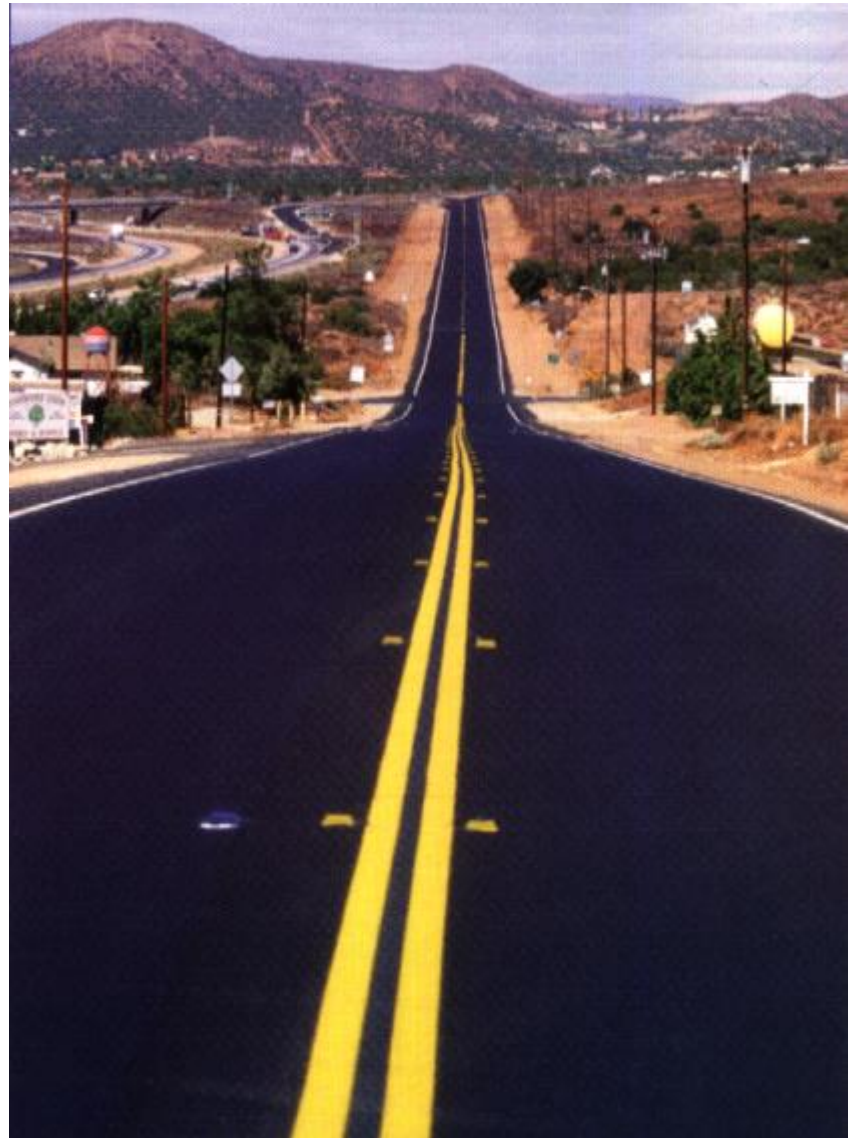
PROCESSO ÚMIDO (PRODUÇÃO)



O ASFALTO-BORRACHA PODE SER UTILIZADO EM DIFERENTES MISTURAS ASFÁLTICAS



**O ASFALTO-BORRACHA
UTILIZA MAIS DE 2000
PNEUS POR FAIXA-
MILHA EM UM TÍPICO
RECAPEAMENTO DE 2
POLEGADAS**



PROCESSO ÚMIDO (PRODUÇÃO)



The background of the slide features a blurred image of a road stretching into the distance under a bright sky with sun rays. A solid blue horizontal band is superimposed over the middle of the image, serving as a backdrop for the title text. A vertical blue bar is also present on the far left edge of the slide.

MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

ASFALTO E A TEMPERATURA

MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE

- Mais utilizadas
- Agregados e ligante devem ser aquecidos antes da usinagem
- Mistura e compactação em elevadas temperaturas



MISTURAS ASFÁLTICAS A FRIO

- Agregados não necessitam de aquecimento prévio
- Uso de emulsão asfáltica
- Mistura e compactação em temperatura ambiente

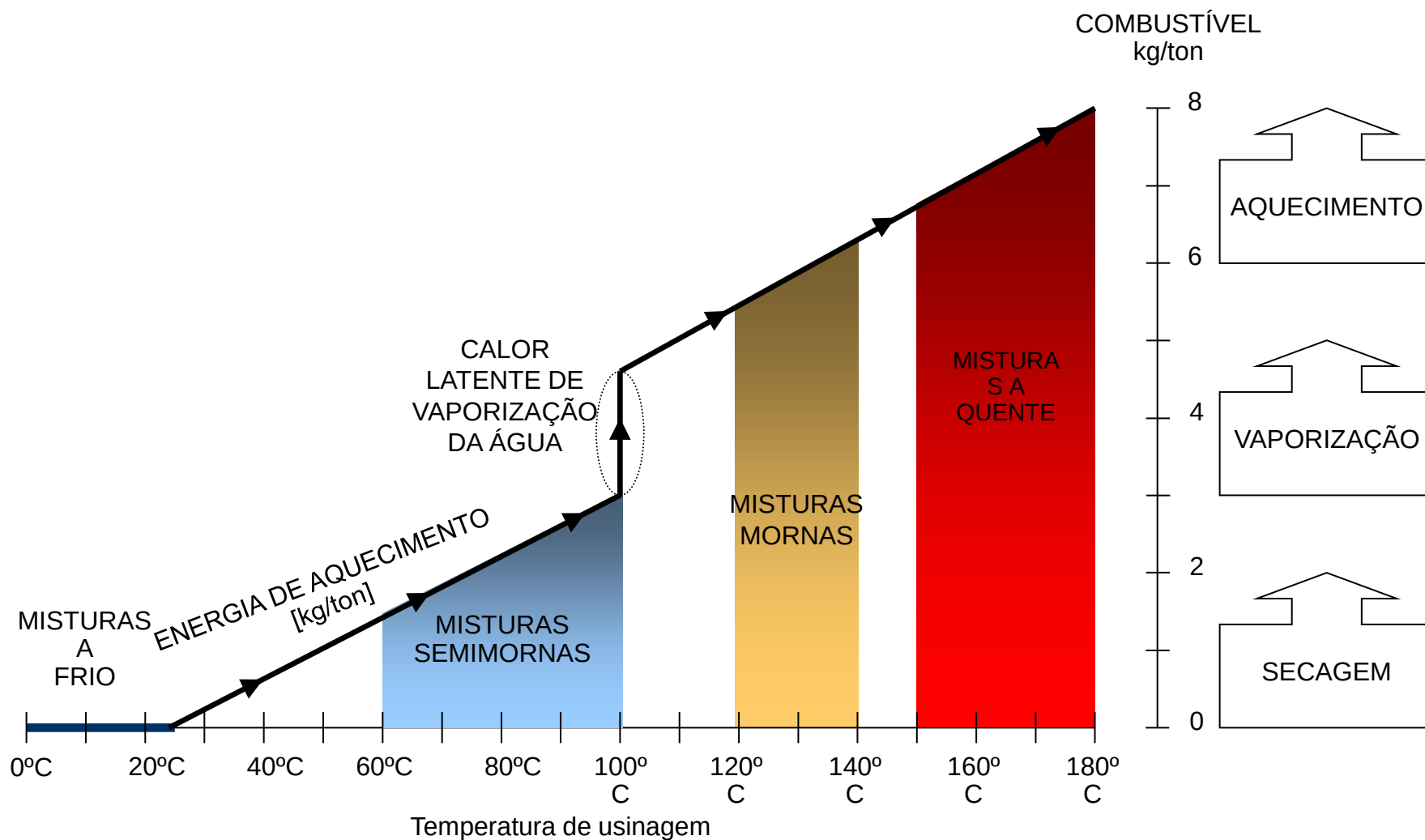


O QUE SÃO AS MISTURAS MORNAS?

- PRODUZIDAS E APLICADAS EM TEMPERATURAS INFERIORES ÀS MISTURAS A QUENTE.
- ENVOLVE A ADIÇÃO DE ALGUMAS ETAPAS NA PRODUÇÃO DAS JÁ CONHECIDAS MISTURAS A QUENTE, MAS NÃO A SUBSTITUIÇÃO POR UMA PROCESSO DIFERENTE.
- HOJE EM DIAS JÁ EXISTEM VÁRIAS TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE MISTURAS MORNAS NO MERCADO.



TEMPERATURAS DE PRODUÇÃO



Como é possível produzir?

- Inserção de aditivos químicos no ligante ou na mistura e/ou
- Modificação do processo de usinagem

Técnicas existentes:

- Aditivos surfactantes
- Aditivos orgânicos (ceras)
- Produção de espuma com o asfalto

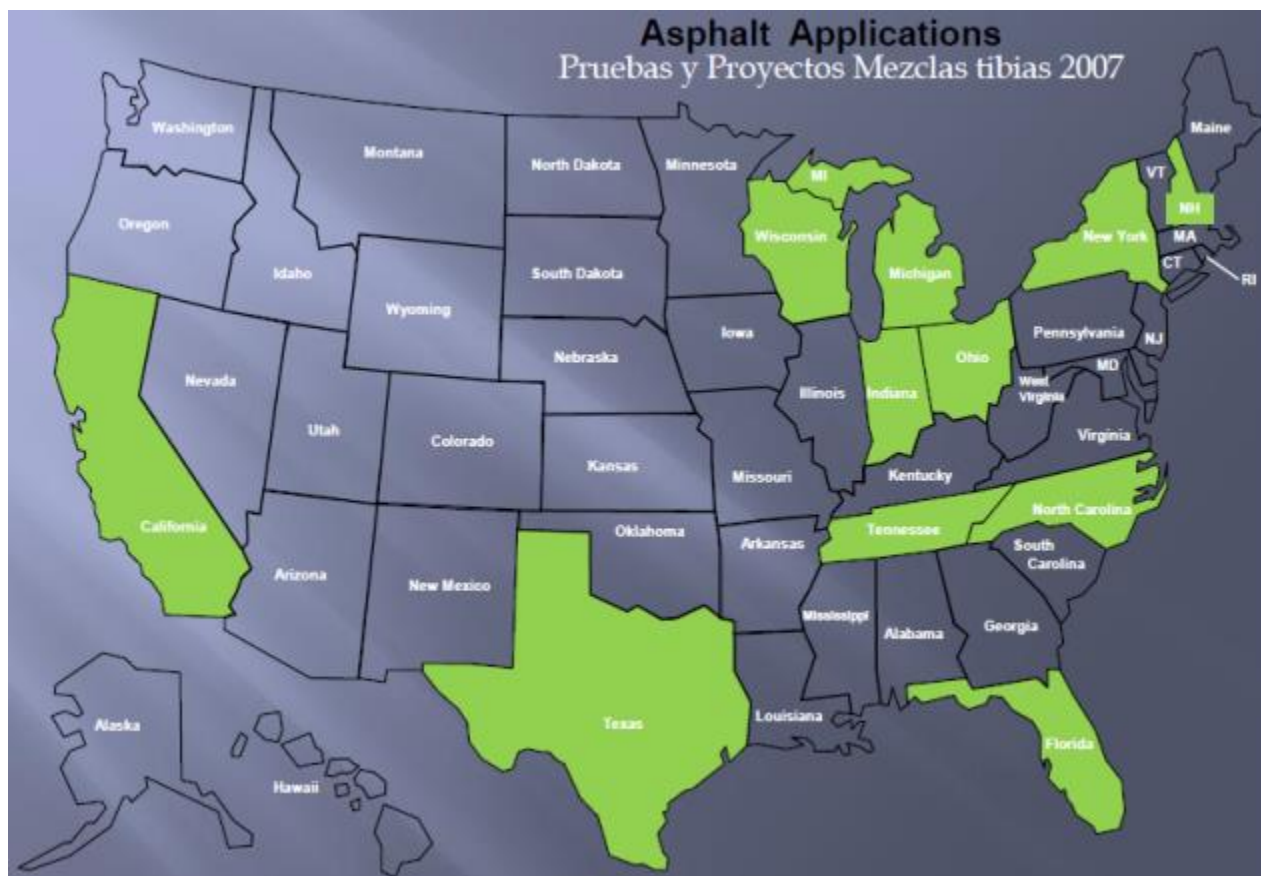
TECNOLOGIAS

- ✓ Entre 2000 e 2003: Pesquisas
- ✓ Entre 2002 e 2005: Trechos experimentais
- ✓ A partir de 2004: Industrialização



Projetos com misturas mornas nos EUA

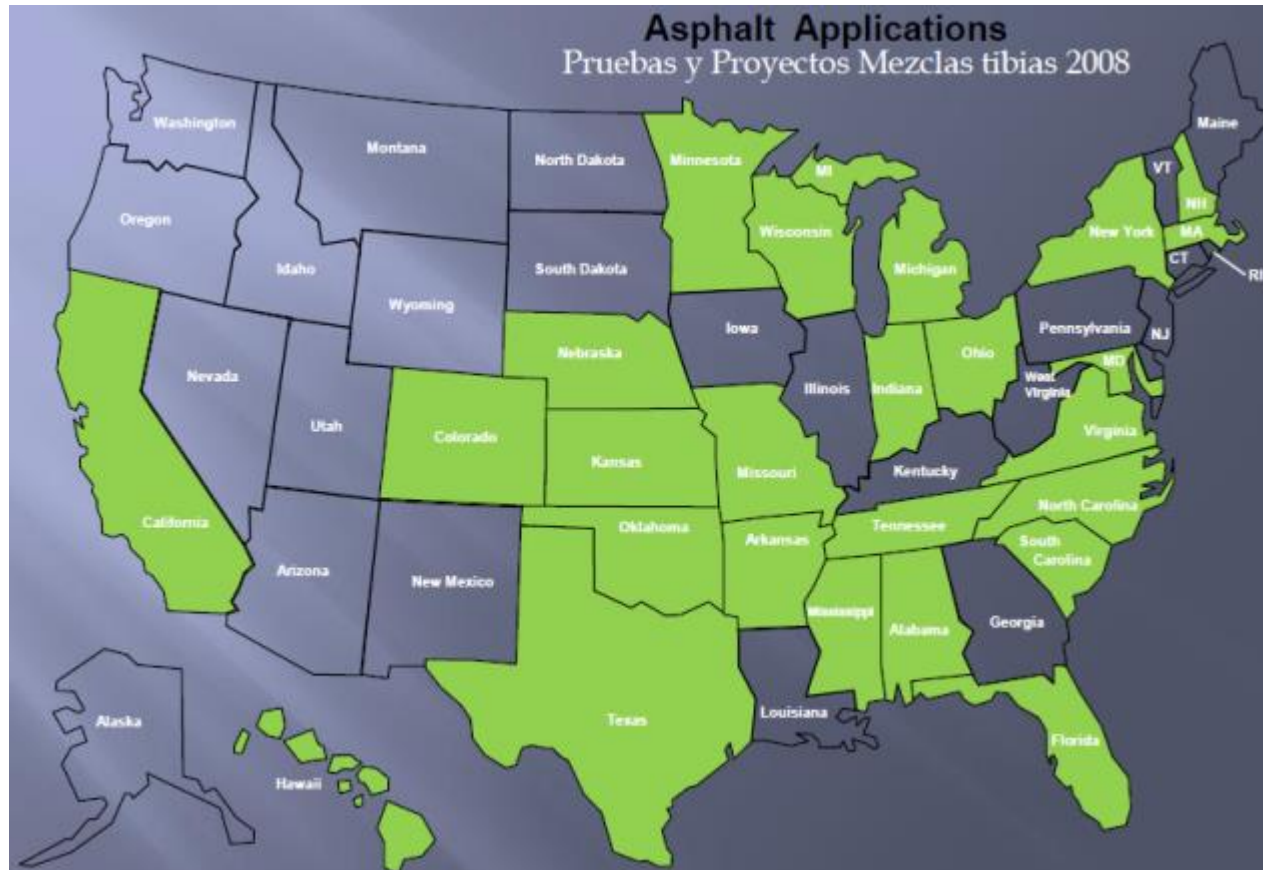
2007



Fonte: Martinez, 2012 (Reunião Anual de Pavimentação Urbana - RPU, 2012) *apud* FHWA

Projetos com misturas mornas nos EUA

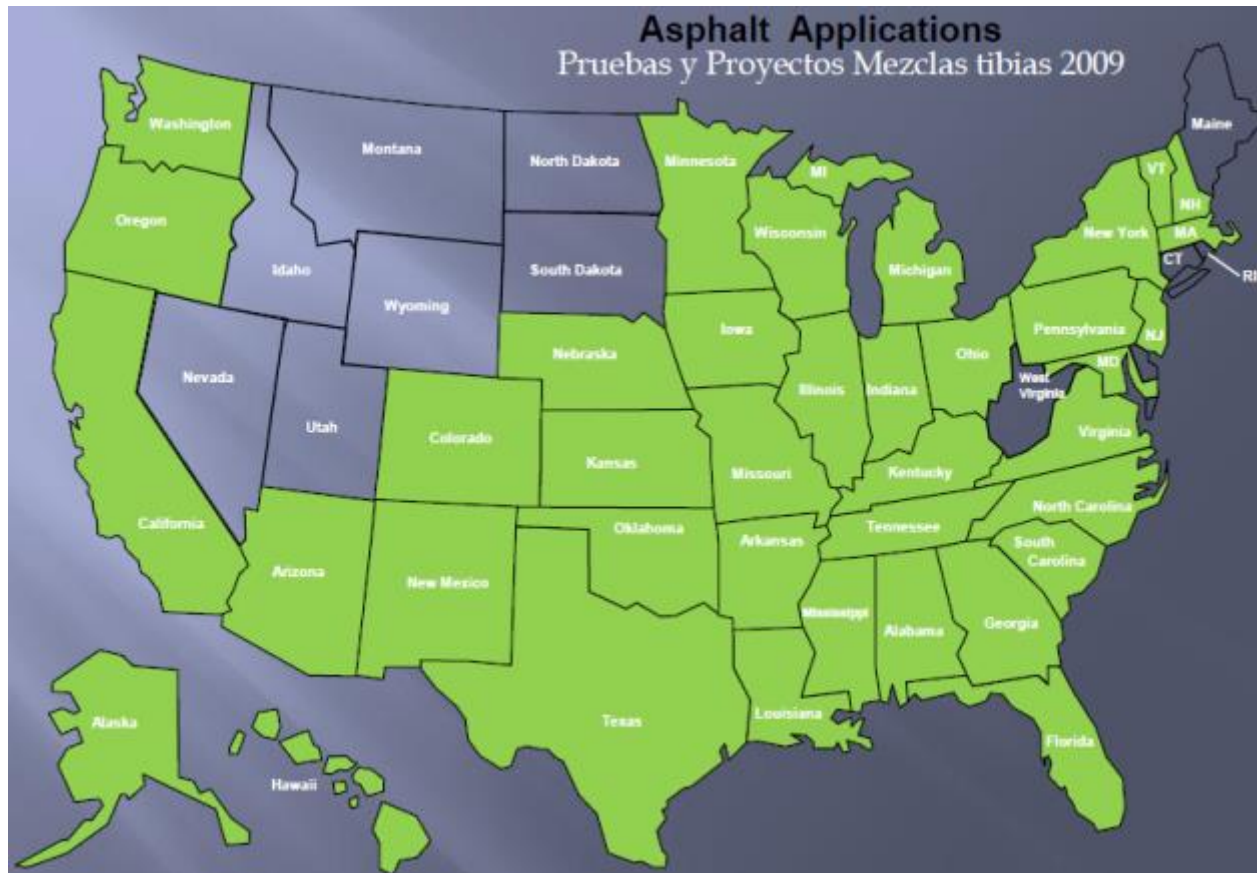
2008



Fonte: Martinez, 2012 (Reunião Anual de Pavimentação Urbana - RPU, 2012) *apud* FHWA

Projetos com misturas mornas nos EUA

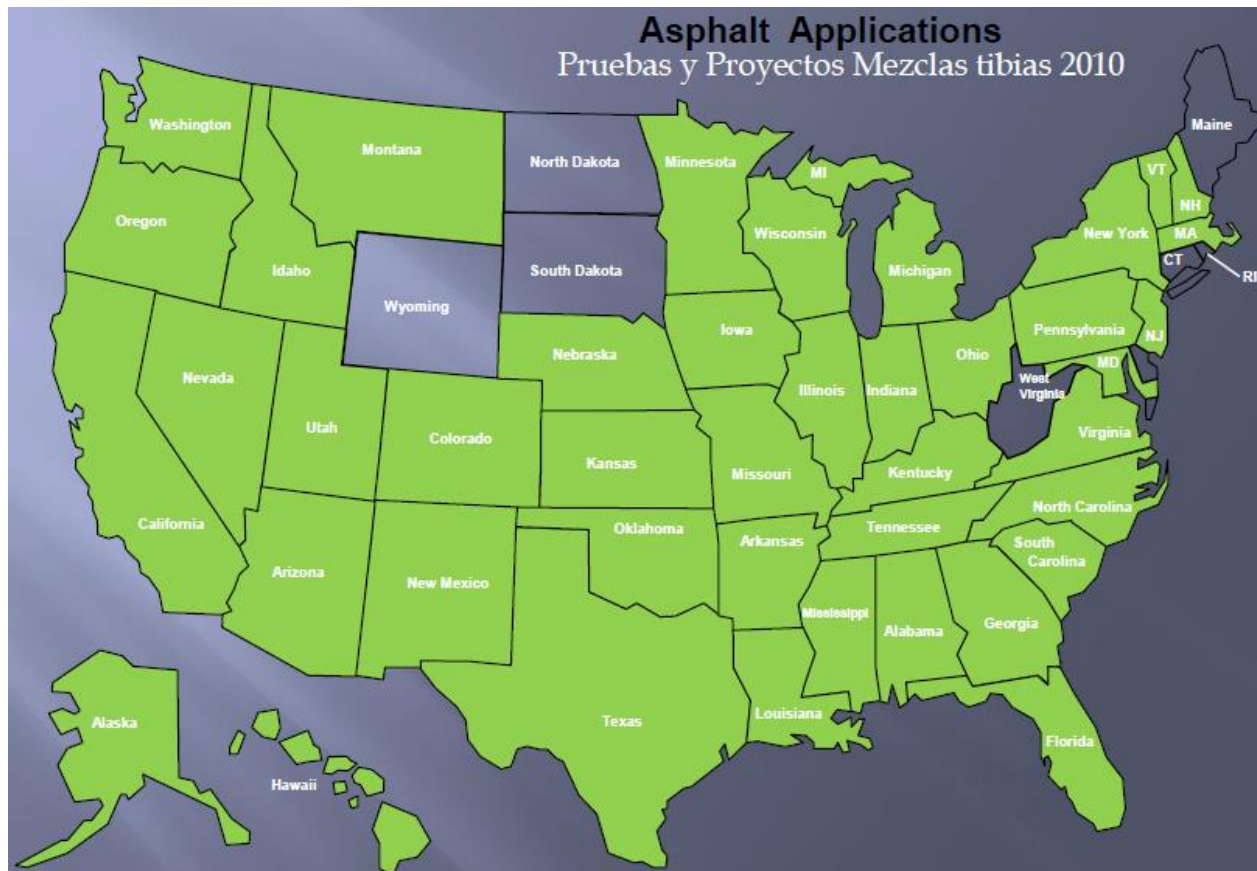
2009



Fonte: Martinez, 2012 (Reunião Anual de Pavimentação Urbana - RPU, 2012) *apud* FHWA

Projetos com misturas mornas nos EUA

2010



Fonte: Martinez, 2012 (Reunião Anual de Pavimentação Urbana - RPU, 2012) *apud* FHWA

POTENCIAIS BENEFÍCIOS



ECONOMIA DE
COMBUSTÍVEL E
REDUÇÃO DE
EMISSÕES



TEMPO DE
ESPALHAMENTO
E COMPACTAÇÃO



REUTILIZAÇÃO
DO RAP
(RECLAIMED
ASPHALT
PAVEMENT)

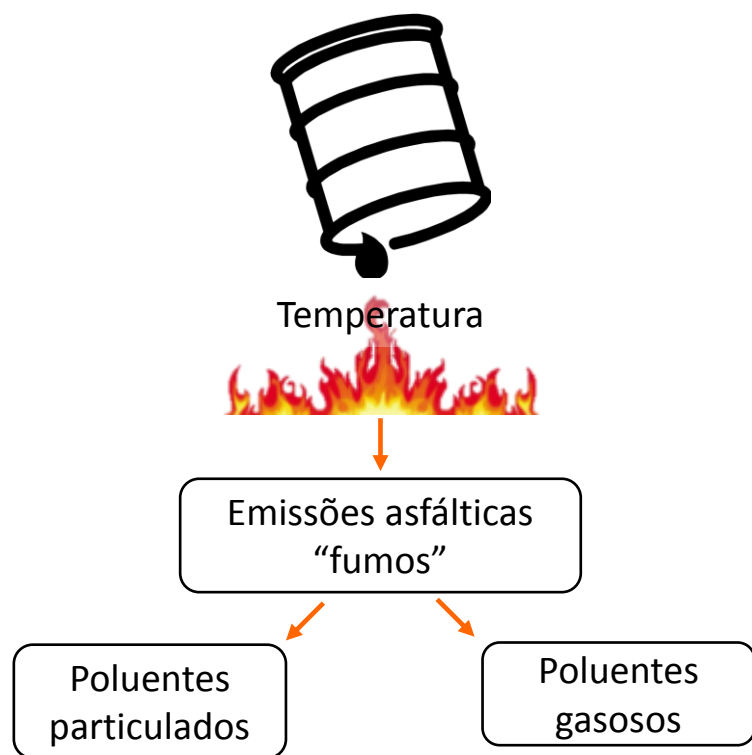
COMBUSTÍVEIS E EMISSÕES

- A ECONOMIA COM COMBUSTÍVEL NA USINA VARIA DE 10-30%
- TEMPERATURAS MAIS BAIXAS REDUZEM AS EMISSÕES DE POLUENTES E OS FUMOS DE ASFALTO
- PODE AUXILIAR ALGUMAS REGIÕES NA TENTATIVA DE ATENDER A UMA MELHOR QUALIDADE DO AR



EMISSÕES

O AQUECIMENTO DE PRODUTOS ASFÁLTICOS PROVOCA EMISSÃO DE FUMOS



↓ emissões = ↓ gases de efeito estufa
↓ exposição ocupacional

ESPALHAMENTO E COMPACTAÇÃO

- MENOR TAXA DE ESFRIAMENTO DA MISTURA ASFÁLTICA (MENOR DIFERENÇA ENTRE A TEMPERATURA DA MISTURA E A TEMPERATURA AMBIENTE)
- A MISTURA PERMANECE TRABALHÁVEL MESMO COM ATRASOS MAIS LONGOS PARA APLICAÇÃO, OU CONDIÇÕES DE TEMPERATURA AMBIENTE MAIS FRIAS.

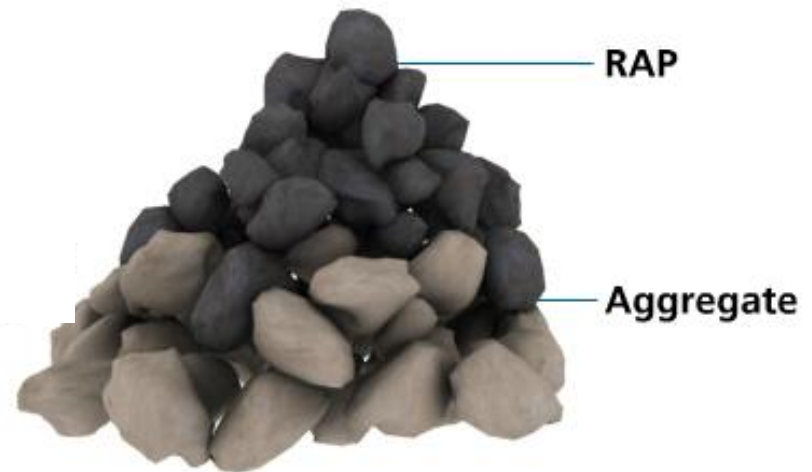


PAVIMENTAÇÃO EM TEMPERATURAS MAIS FRIAS

- A COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS MORNAS É ATINGIDA EM TEMPERATURAS MAIS BAIXAS DEVIDO A REDUZIDA VISCOSIDADE.
- PERMITE A PAVIMENTAÇÃO EM TEMPERATURAS MAIS BAIXAS, OU MESMO EM PERÍODOS MAIS EXTENSOS.
- PODE SER VANTAJOSA NA COMPACTAÇÃO DE MISTURAS MAIS RÍGIDAS.

USO DE MATERIAL FRESADO (RAP)

- ATRAVÉS DO USO DAS TECNOLOGIAS DE MISTURAS MORNAS, É POSSÍVEL AUMENTAR O PERCENTUAL DE RAP NA MISTURA.
- LEVA A BENEFÍCIOS FINANCEIROS E AMBIENTAIS.
- AS TEMPERATURAS REDUZIDAS CAUSAM MENOS ENVELHECIMENTO DO LIGANTE ASFÁLTICO.
- VISCOSIDADE MAIS BAIXA FACILITA O PROCESSO DE COMPACTAÇÃO COM O RAP



POTENCIAIS RISCOS



Erratic burner



Asphalt not flowing readily

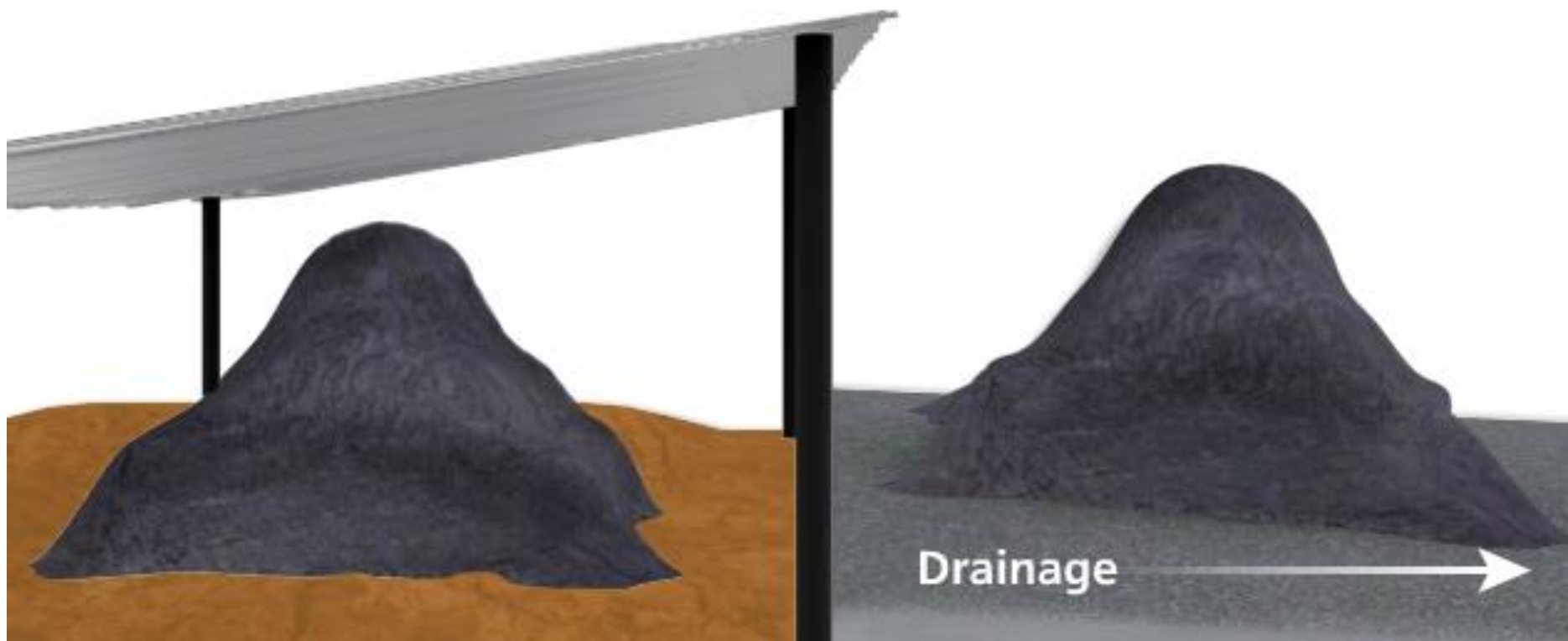


Pavement cracking

MELHORES PRÁTICAS:

- MANUTENÇÃO APROPRIADA DE EQUIPAMENTOS
- OPERAR EM TAXAS NORMAIS DE PRODUÇÃO
- ADITIVOS COM PROPORÇÕES/PROPRIEDADES ADEQUADAS

EXCESSO DE UMIDADE NOS AGREGADOS

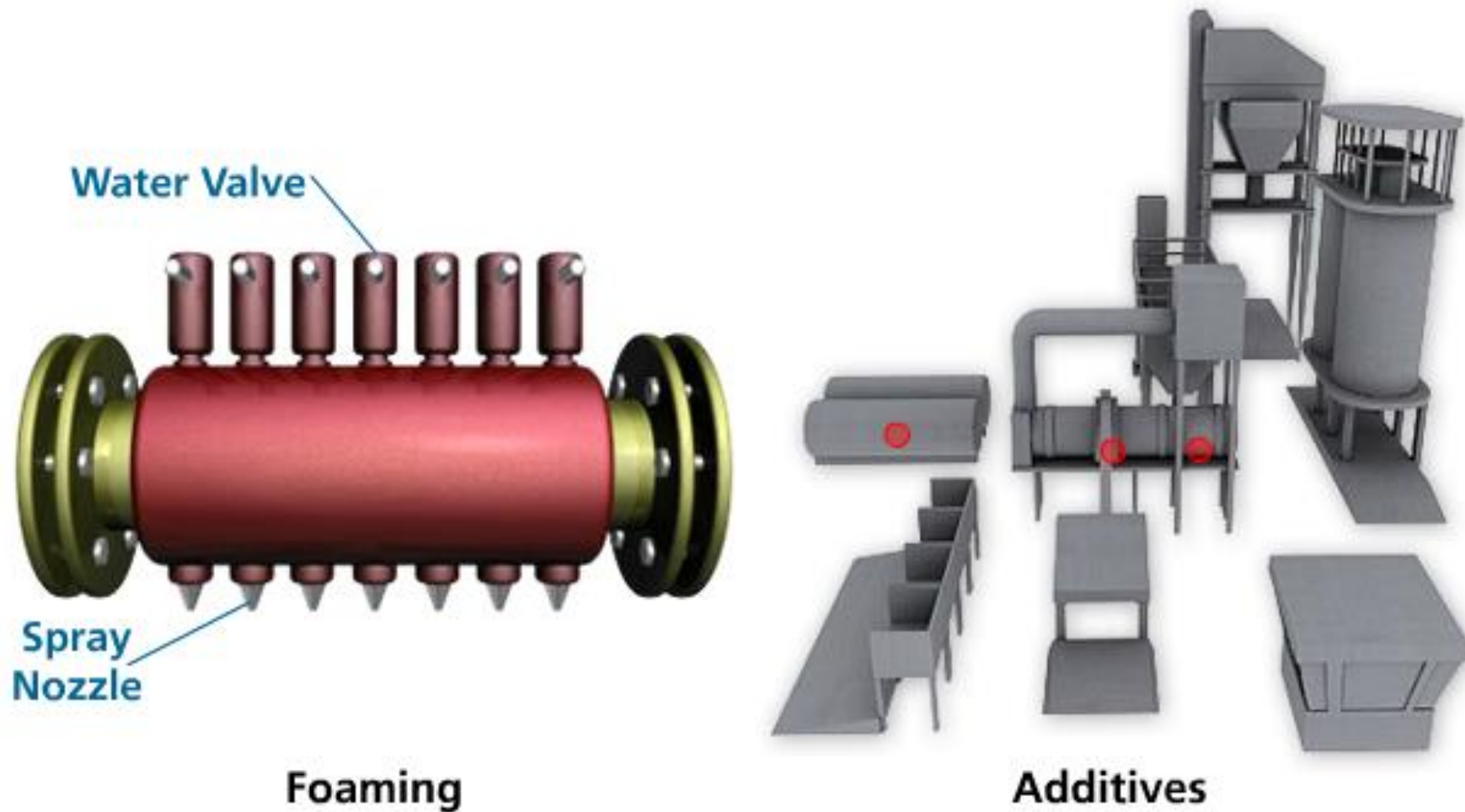


IMPACTO NO CUSTO

- IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA DE MISTURA MORNA
- REDUÇÃO NOS CUSTOS DE COMBUSTÍVEL
- CUSTO SIMILAR DOS DEMAIS MATERIAIS
- ECONOMIA COM O AUMENTO NO USO DE RAP



TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE MISTURAS MORNAS



ASFALTO ESPUMADO

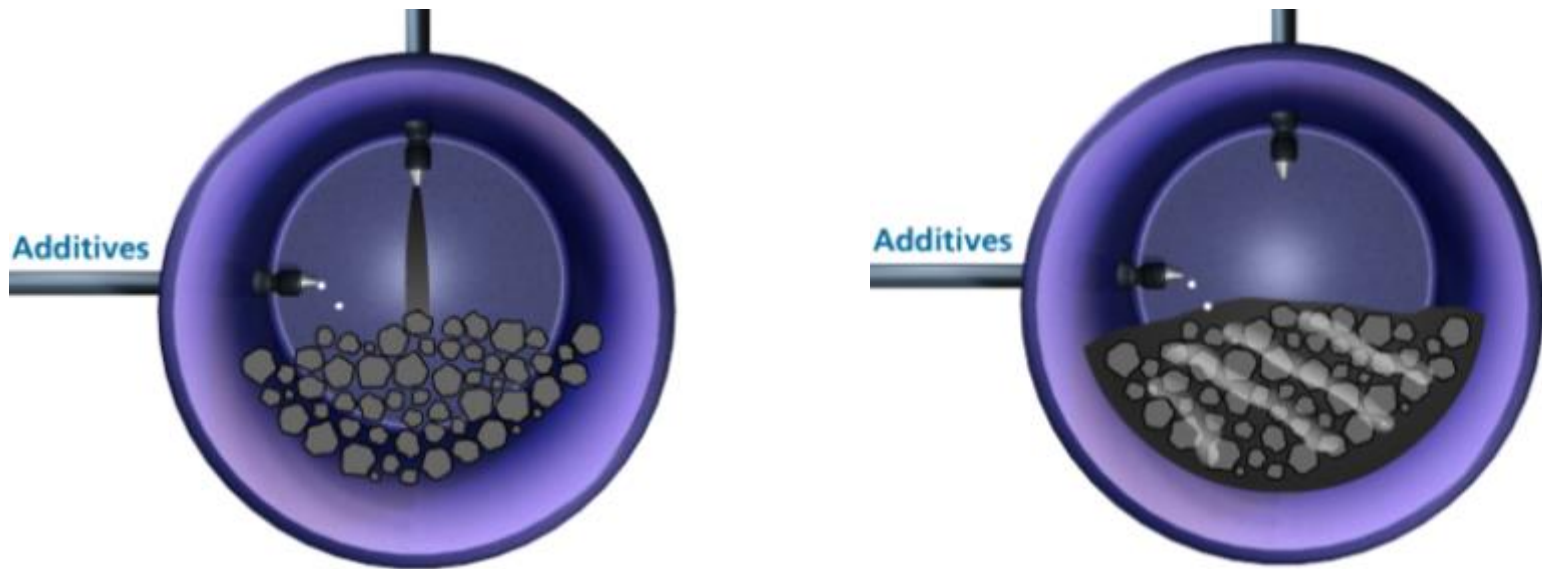
- Ligante aquecido + água em temperatura ambiente = expansão do asfalto



<http://www.paviasystems.com/warmmix/>

ASFALTO ESPUMADO

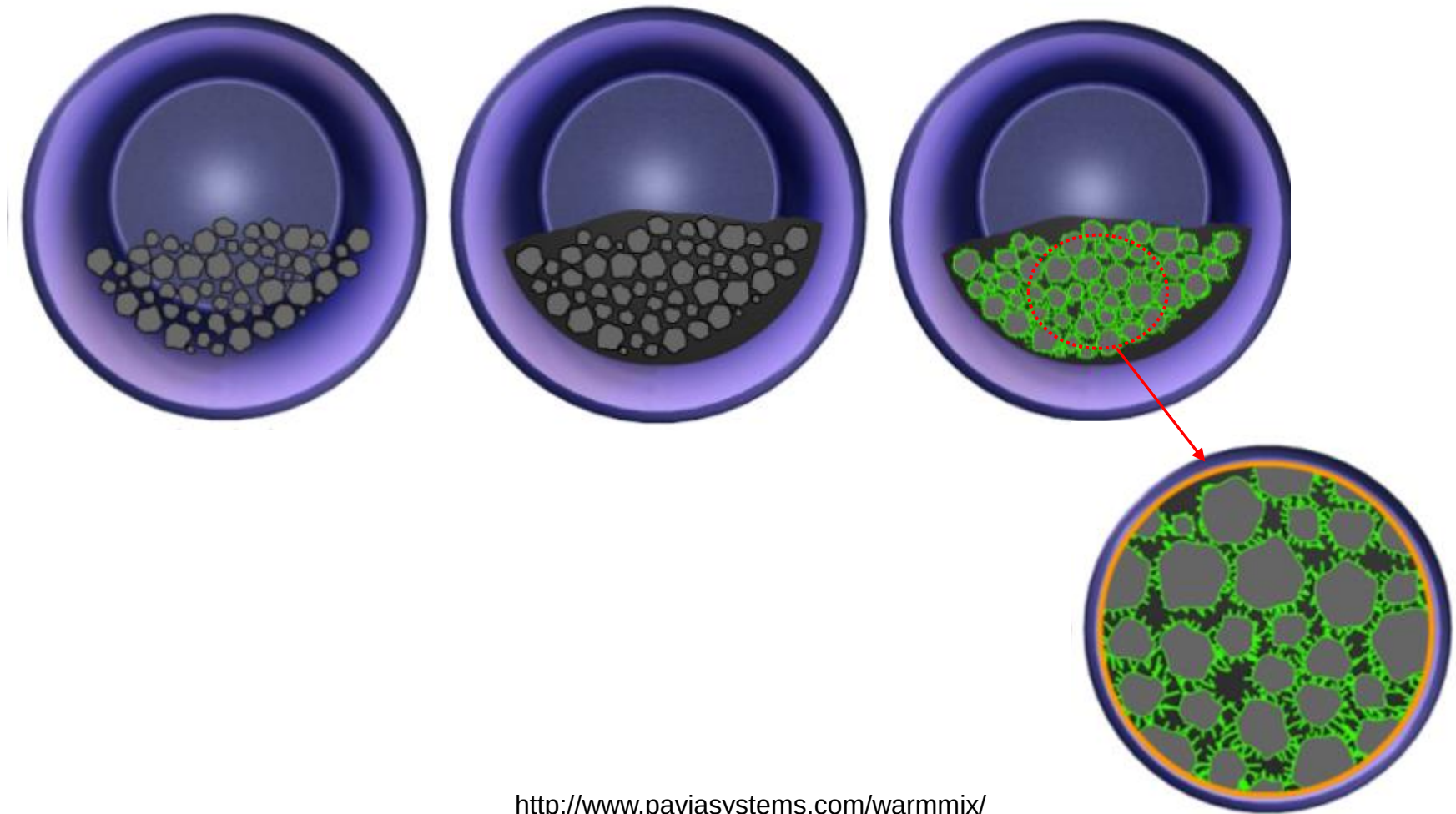
Aditivos tipo zeólitas (cristais naturais ou sintéticos com grande quantidade de água, que vai sendo liberada com a elevação da temperatura durante a mistura, formando o efeito de espuma)



<http://www.paviasystems.com/warmmix/>

TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE MISTURAS MORNAS

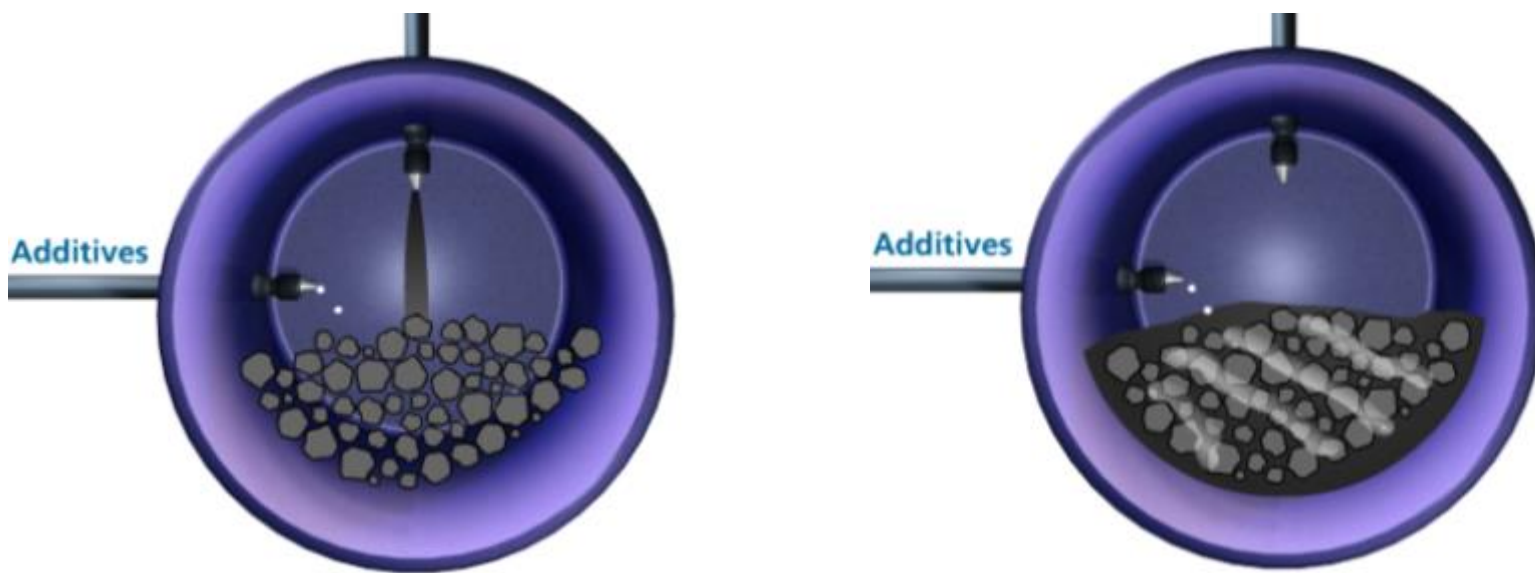
ADITIVOS SURFACTANTES (lubricidade) / melhoradores de adesividade



<http://www.paviasystems.com/warmmix/>

TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE MISTURAS MORNAS

ADITIVOS ORGÂNICOS (ceras) que reduzem a viscosidade do ligante asfáltico

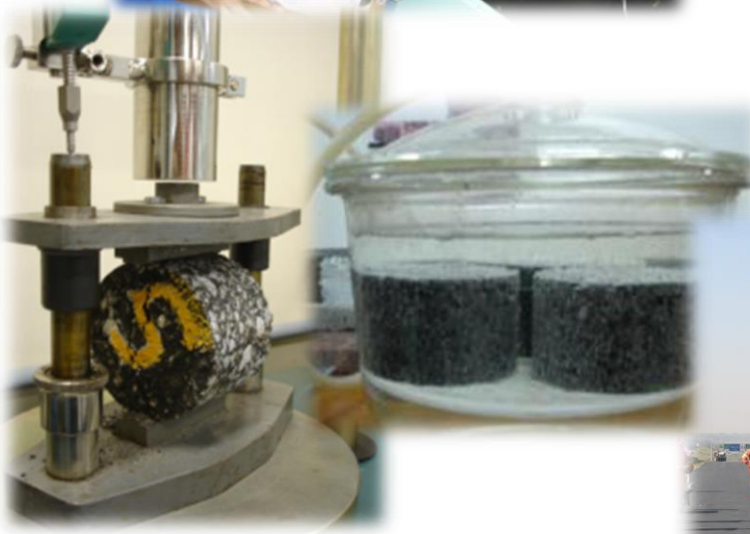


<http://www.paviasystems.com/warmmix/>

PESQUISA NA USP



Rodovia Presidente Dutra (2009)



BONS RESULTADOS



Rodovia dos Bandeirantes (2010)

RODOVIA DOS BANDEIRANTES



gap-graded



asfalto-borracha
(20% de borracha)
teor 6,5%



Aditivo surfactante
Gemul XT14 (0,4%)

- Usina Basalto 6 (Gravimétrica)
- Temperatura de **usinagem a quente** entre 170 e 180°C
- Temperatura de **usinagem morna** entre 140 e 150°C

EMISSÕES

- Amostragem em usina – **EMISSÃO DE POLUENTES**



EMISSIONES

- Diferença de emissões em usina



Mistura MORNA



Mistura QUENTE

EMISSÕES

- Amostragem em pista – **EMISSÃO DE POLUENTES**



EMISSIONES

- Diferença de emissões em pista



Mistura MORNA



Mistura QUENTE

EMISSÕES

- Espalhamento em pista



Mistura MORNA



Mistura QUENTE

COMPACTAÇÃO



- Temperatura de **compactação a quente** entre 150 e 180°C
Temperatura de **compactação morna** entre 130 e 150°C

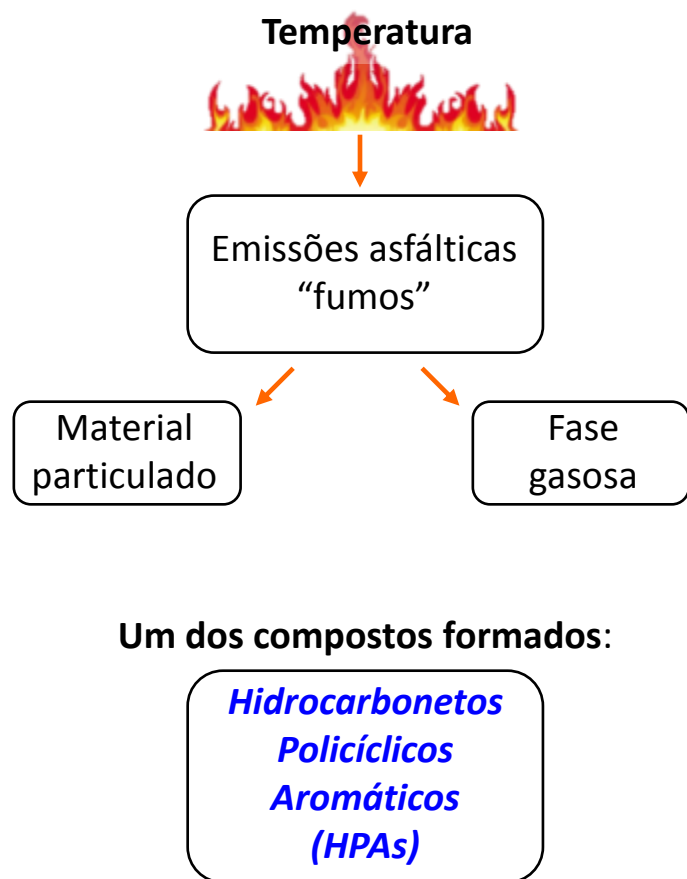
COMPACTAÇÃO



CONTROLE TECNOLÓGICO

	GC	VV	Espes.
	[%]	[%]	[cm]
Mistura a quente	98,6 ($\pm 0,6$)	6,1 ($\pm 0,8$)	3,5 ($\pm 0,5$)
Mistura morna	99,2 ($\pm 0,4$)	5,9 ($\pm 0,5$)	3,9 ($\pm 0,4$)

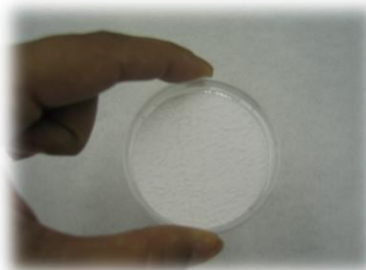
DNIT: $97 \leq GC \leq 101$
 $VV \leq 7,5$
Espessura $\geq 2,9$ cm



É provável que vapores asfálticos gerados em altas temperaturas sejam mais suscetíveis à formação de **HPAs** perigosos do que os produzidos em temperaturas mais amenas (NIOSH, 2000)

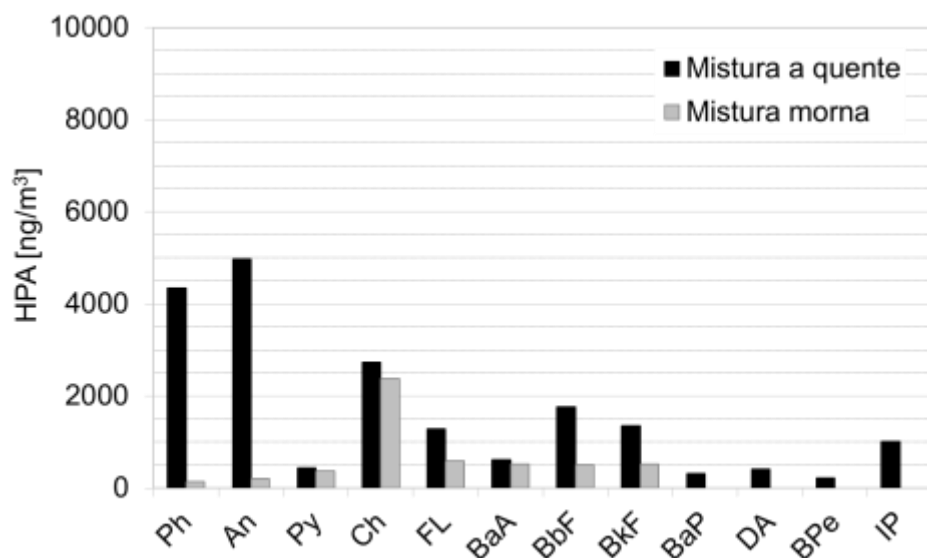
Mistura morna X Mistura a quente

Equipamento de amostragem



EMISSIONS

Resultado de emissões em laboratório



HPA	Mistura a quente	Mistura morna
	Concentração [ng/m³]	
Ph	4345	137
An	4968	211
Py	439	371
Ch	2735	2379
FL	1289	581
BaA	616	513
BbF	1757	512
BkF	1352	521
BaP	318	—
DA	407	—
BPe	219	—
IP	1014	—
Total	19458	5226

ECONOMIA DE ENERGIA

- Grande parte do consumo de energia se deve à secagem/vaporização/aquecimento dos agregados na usinagem



- O gasto de combustível chega a aumentar 10% para cada 1% a mais de água nos agregados
- Com misturas mornas a redução pode ser de 20% a 30% (Prowell e Hurley, 2007) ou chegando até 60% (Olard, 2008)

Mistura a quente



Mistura morna



Fonte: Devivere et al (2001)

↓ 30% consumo energético

- Parâmetros adotados na **estimativa**:

calor específico dos agregados (C_{agr})	0,85 kJ/kg/°C
calor específico da água (C_a)	4,2 J/kg/°C
calor específico de vapor (C_v)	1,85 J/kg/°C
calor latente de vaporização da água (clv)	2250 kJ/kg/°C
teor de umidade dos agregados (u_{agr})	3%

$$C_{agr} \times m_{agr} \times (t_{agr} - t_{amb})$$

$$clv \times \left(\frac{m_{agr}}{m_{agr} - \frac{u}{100} * m_{agr}} - 1 \right) \times m_{agr}$$

$$C_a \times \left(\frac{m_{agr}}{m_{agr} - \frac{u}{100} * m_{agr}} - 1 \right) \times m_{agr} \times (100 - t_{amb})$$

$$C_v \times \left(\frac{m_{agr}}{m_{agr} - \frac{u}{100} * m_{agr}} - 1 \right) \times m_{agr} \times (t_{agr} - 100)$$

ECONOMIA DE ENERGIA

- Exemplo: Usinagem para trecho da Rodovia dos Bandeirantes

	Mistura morna	Mistura a quente
	Energia estimada [MJ]	
Aquecimento dos agregados	42.917	55.434
Aquecimento da água	4.099	4.099
Vaporização d'água	29.279	29.279
Aquecimento do vapor	1.083	1.926
Total	77.378	90.738
Redução de energia com os agregados na mistura morna [%]	15	



Profa. Kamilla Vasconcelos

kamilla.vasconcelos@usp.br