



ESCOLA
POLITÉCNICA
DA USP

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

PTR 2388 – TRANSPORTE E MEIO AMBIENTE

**SUSTENTABILIDADE E RECICLAGEM
DE MATERIAIS EM PAVIMENTAÇÃO**

14/ABR/2016




ESCOLA
POLITÉCNICA
DA USP

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

RECICLAGEM DE PAVIMENTOS E USO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Profa. Kamilla Vasconcelos

kamilla.vasconcelos@usp.br



RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

INTRODUÇÃO



Todos os dias, centenas de metros cúbicos de material fresado são gerados em todo o Brasil.

VANTAGENS DA RECICLAGEM DE PAVIMENTOS



- **ASPECTOS AMBIENTAIS** (consumo de energia, preservação de fontes naturais de materias, destino adequado aos materiais fresados, emissão de fumos durante a produção/construção)



- **ASPECTOS TÉCNICOS** (tempo de construção, ambiente de trabalho adequado)



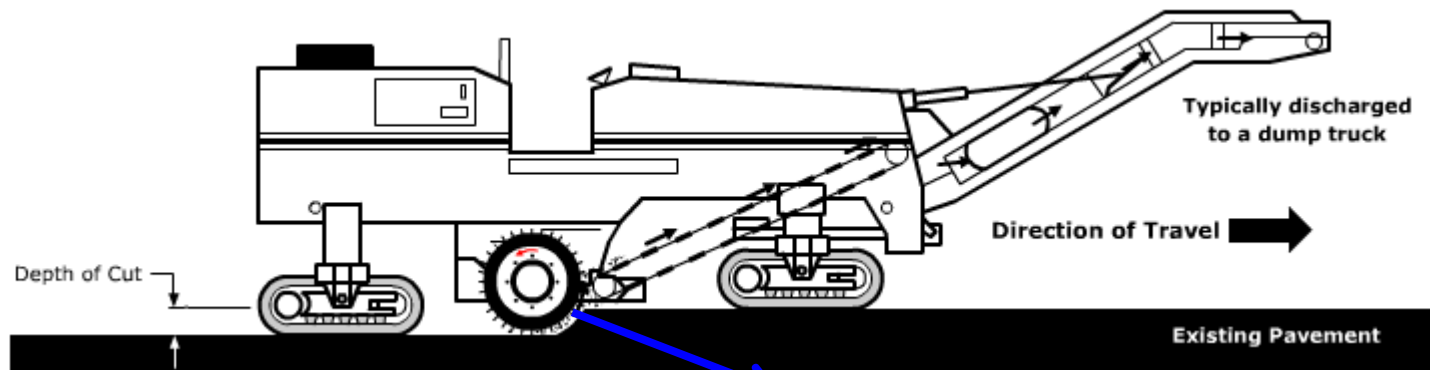
- **ASPECTOS RELACIONADOS AO DESEMPENHO** (novos métodos de dosagem/dimensionamento, boas propriedades mecânicas)



- **ASPECTOS ECONÔMICOS** (custo dos insumos, produção, transporte e descarte de materiais fresados)

FRESAGEM

FRESAGEM

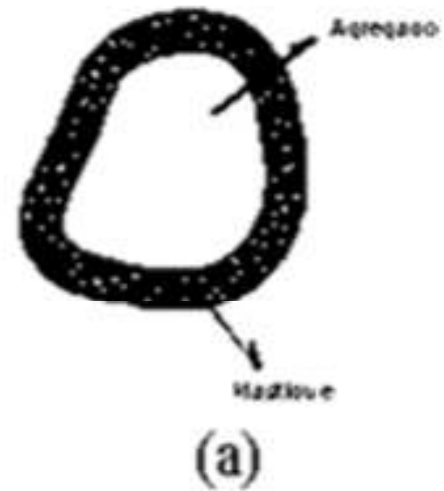


**REUTILIZAÇÃO DO MATERIAL
ASFÁLTICO ENVELHECIDO**



FRESAGEM

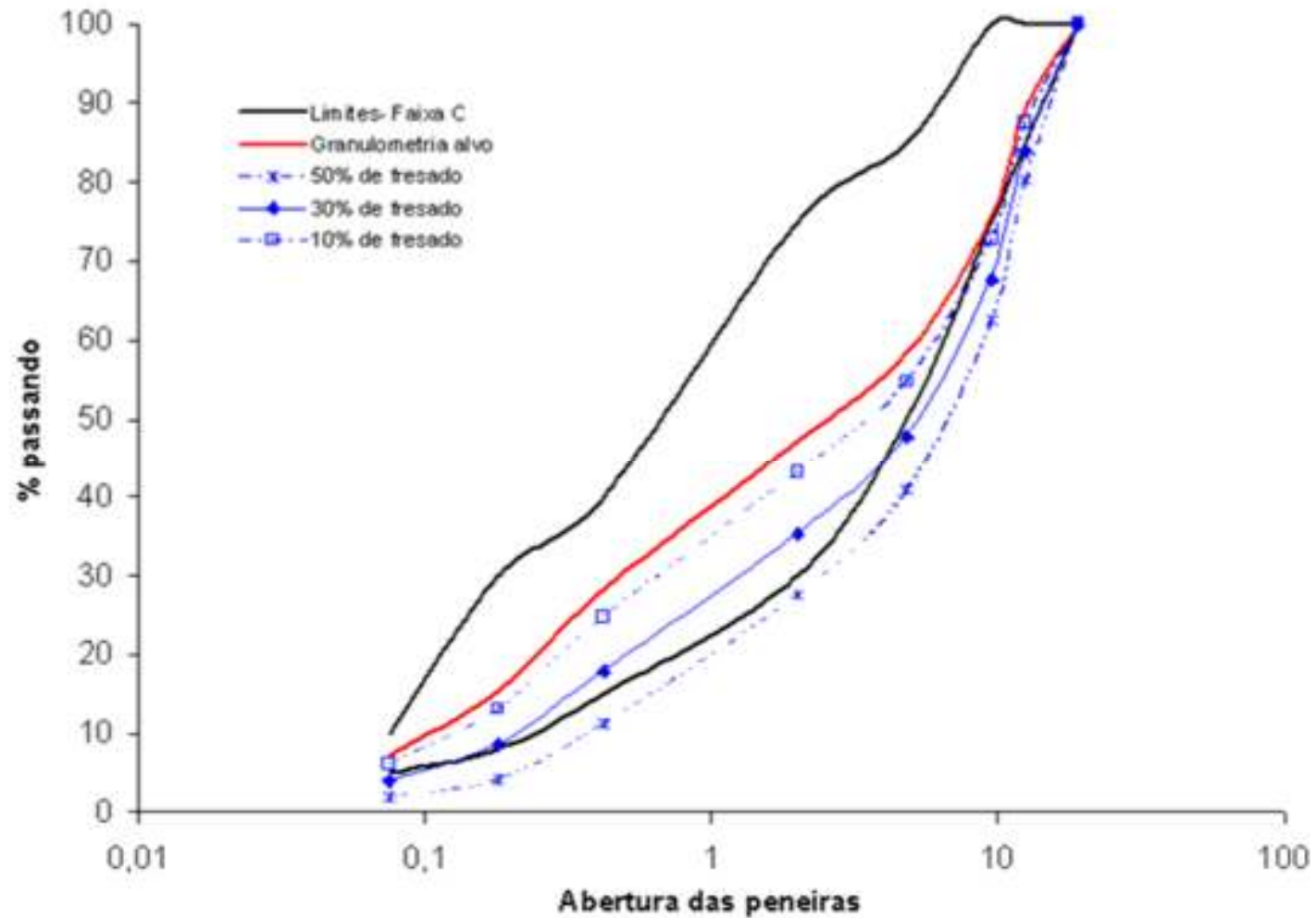
Possível Heterogeneidade do Material Fresado



Fonte: Vasconcelos e Soares (2004)

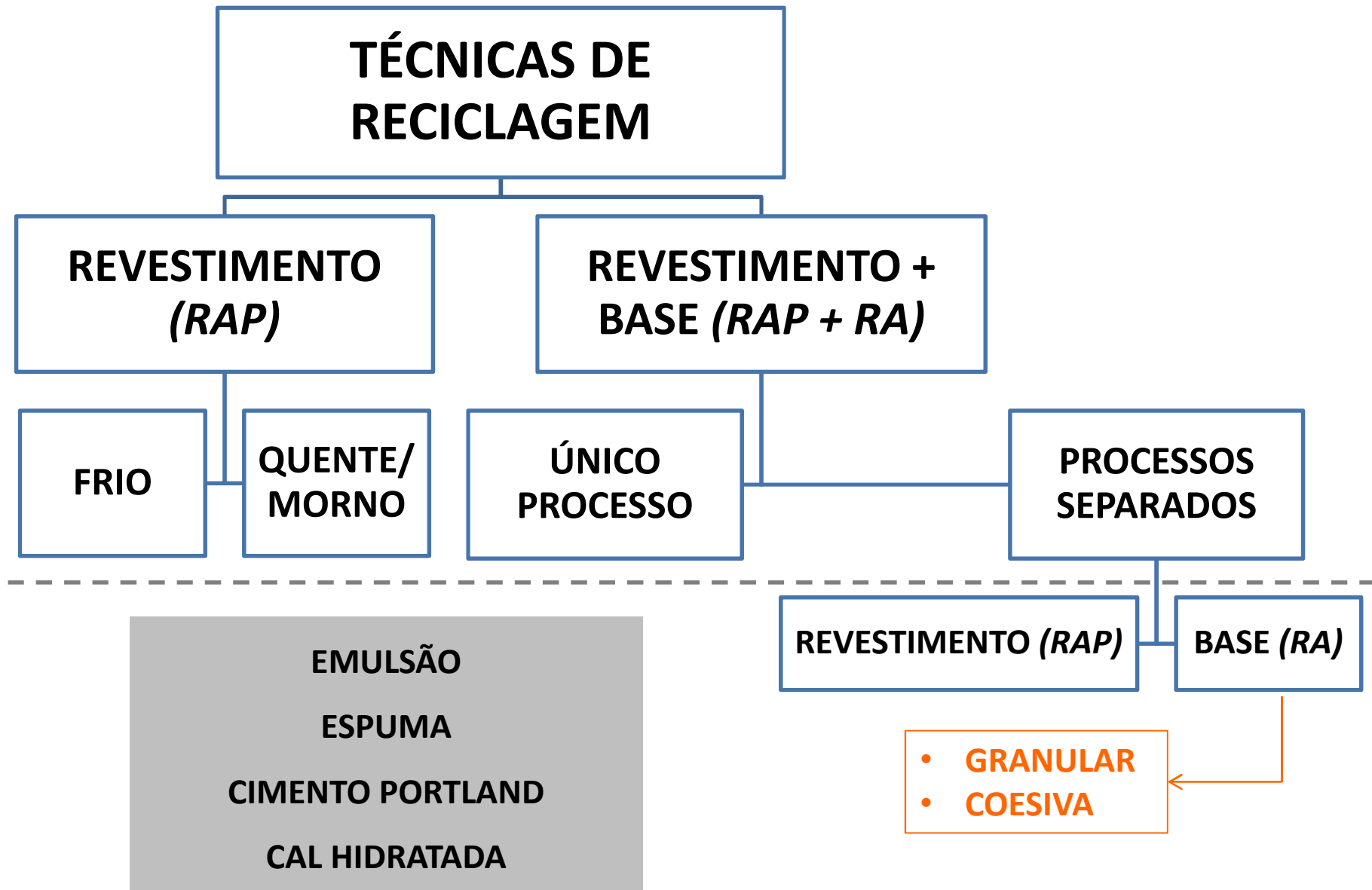
FRESAGEM

Não Desestruturação dos Grumos de RAP

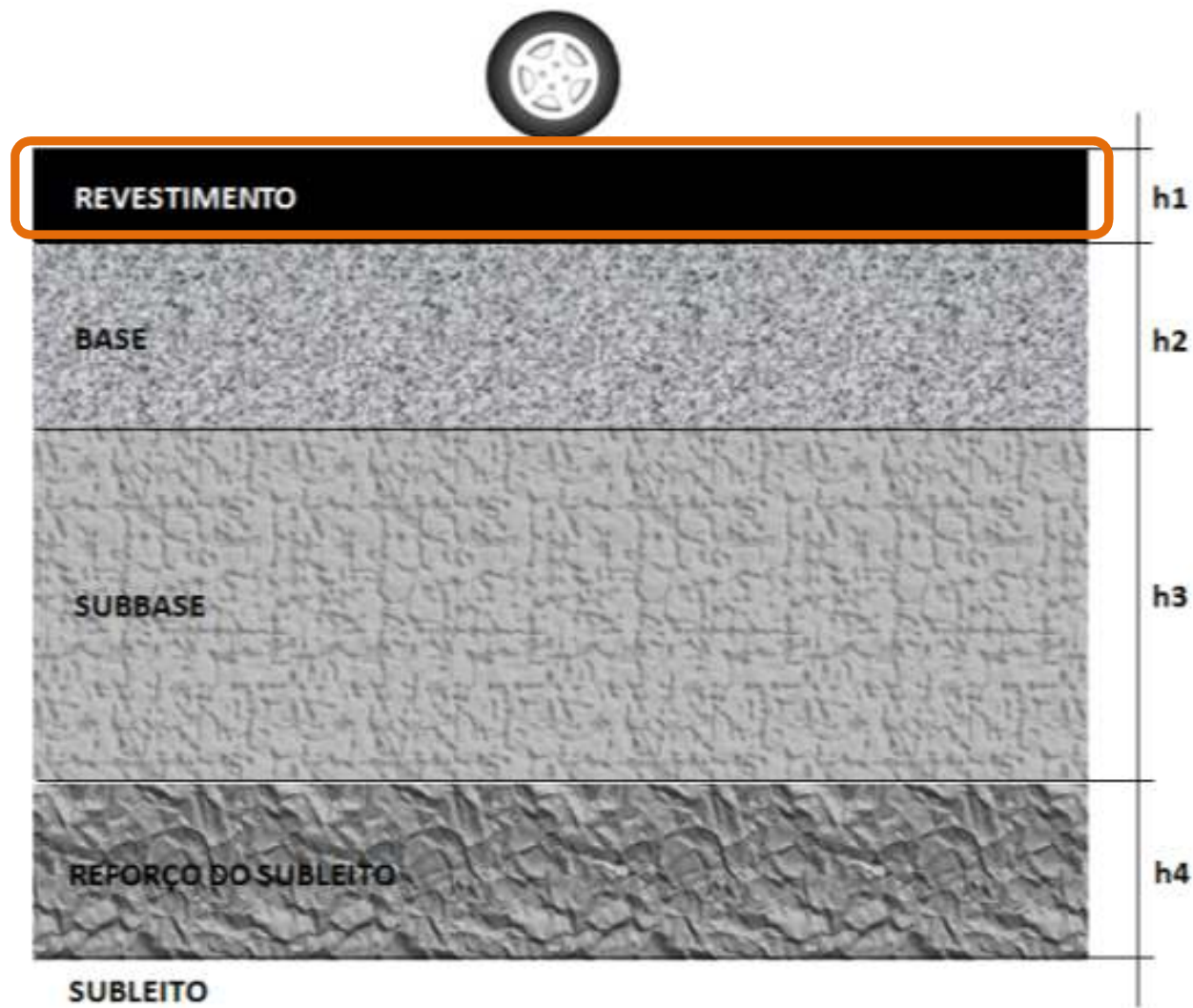


Fonte: Vasconcelos e Soares (2004)

TÉCNICAS DE RECICLAGEM



RECICLAGEM DO REVESTIMENTO



RECICLAGEM DO REVESTIMENTO

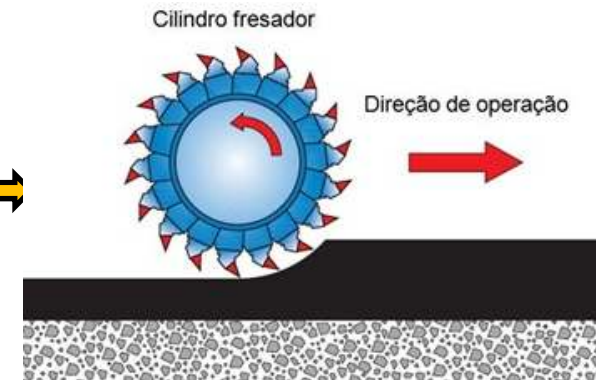
MISTURA ASFALTICA NOVA



REVESTIMENTO DETERIORADO



FRESAGEM DO PAVIMENTO



Novos materiais



RAP



RECICLAGEM **A QUENTE** EM USINA

PILHAS DE FRESADO (RAP)

RECICLAGEM MORNA - MOTIVAÇÃO

ECONOMIA DE RECURSOS NATURAIS

RECICLAGEM



- REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

MISTURAS
ASFALTICAS
MORNAS

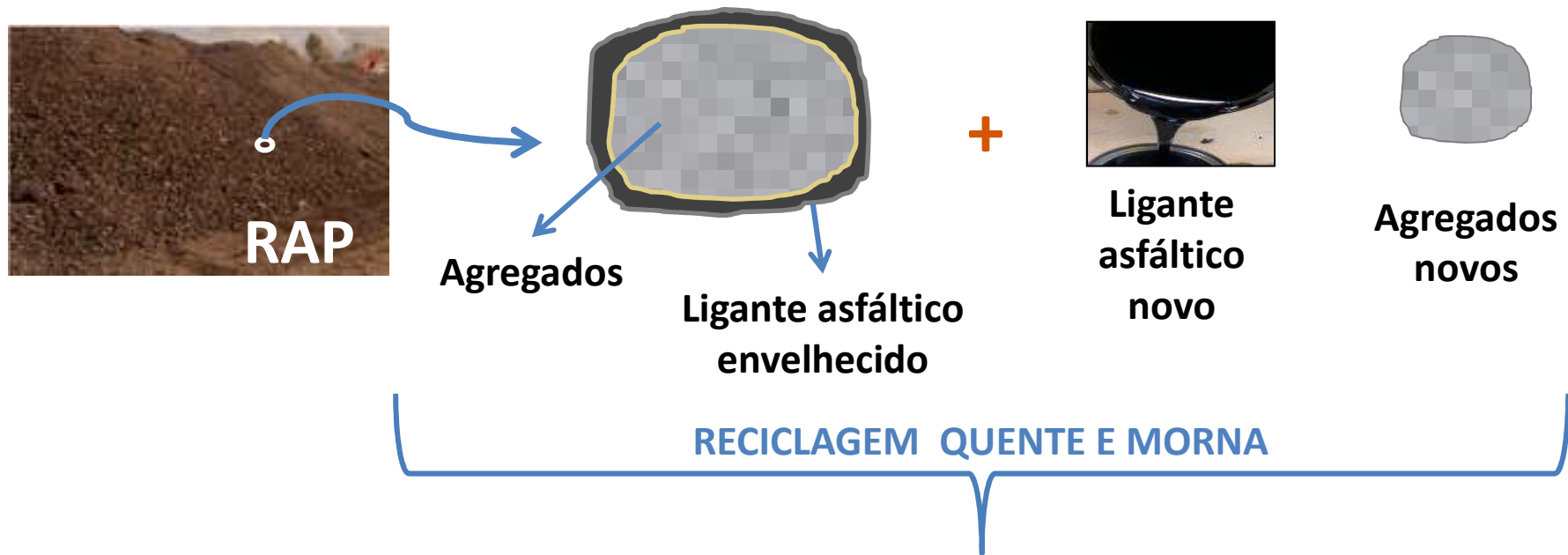


SUSTENTABILIDADE

Pavimentos Sustentáveis

Fonte: Genesseeaux (2015)

RECICLAGEM DO REVESTIMENTO

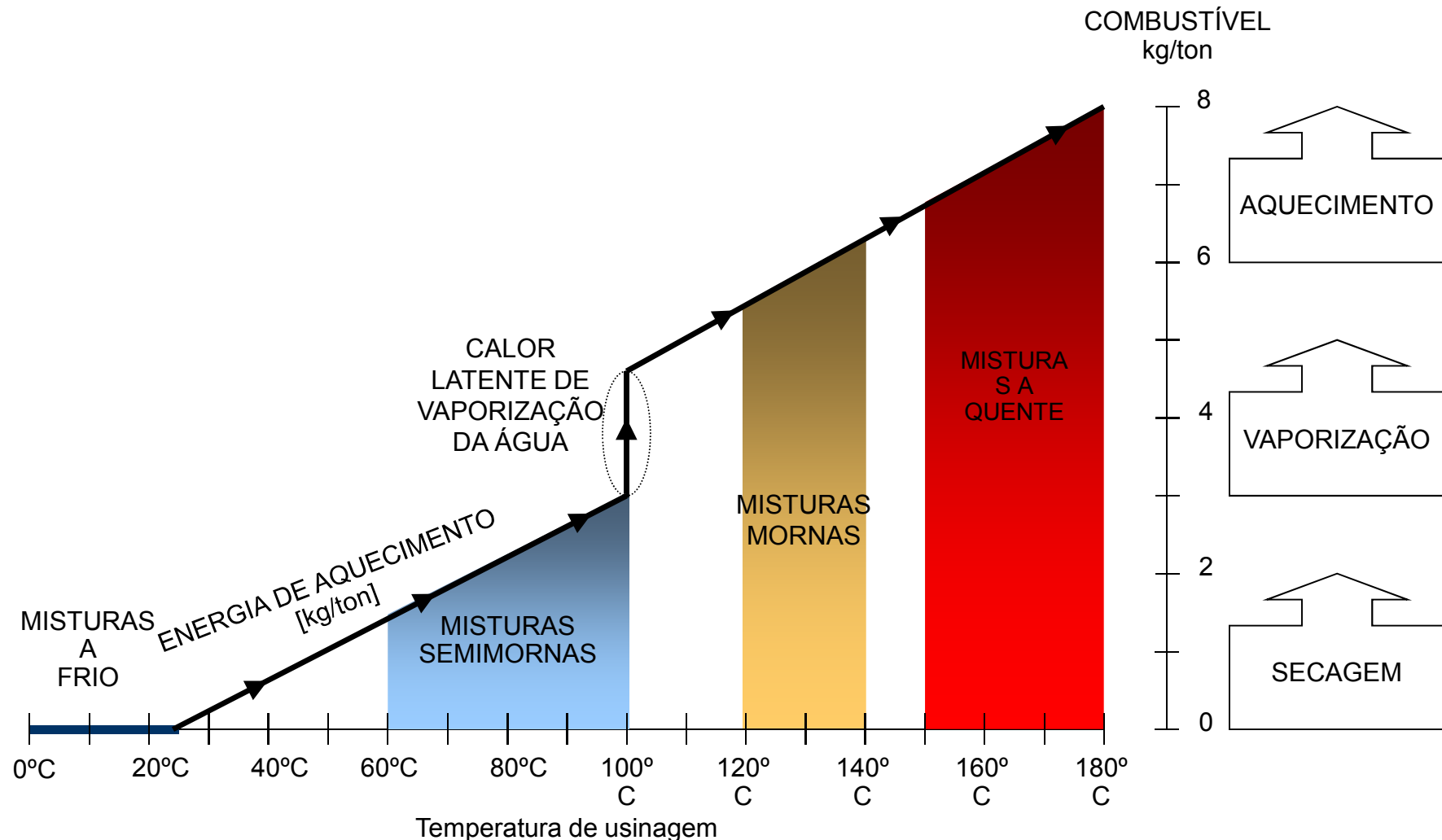



Incorporação do RAP em teores acima de 25% apresenta limitações:

- ❑ Origem do RAP, Idade do RAP, Tipo de ligante do RAP
- ❑ Superaquecimento dos agregados novos para aquecer o RAP
- ❑ Grau de mistura entre o ligante do RAP e ligante novo
- ❑ **Durabilidade das misturas recicladas**

MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS (aula anterior)

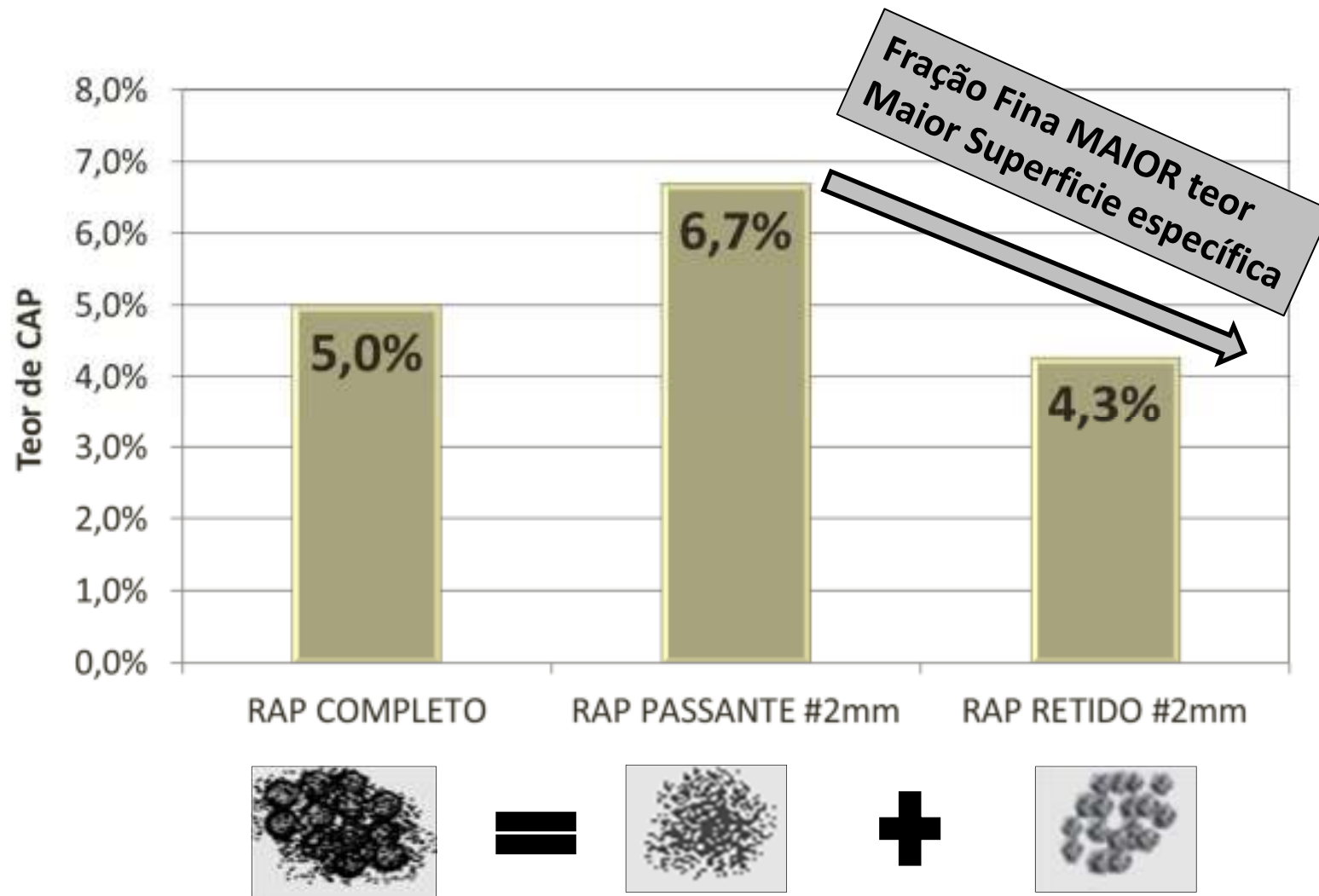
- ✓ preços energéticos; aquecimento global e normas ambientais mais restritivas → redução de temperatura da ordem de **30°C ou mais** em relação às misturas a quente.
- ✓ aditivos surfactantes ou ceras ou espuma





**COMO ASSOCIAR AS
TÉCNICAS DE
RECICLAGEM COM A
DE PRODUÇÃO DE
MISTURAS MORNAS?**

RECICLAGEM MORNA



Fonte: Genesseeux (2015)

RECICLAGEM MORNA – ESTUDO DE CASO (USP)

❑ Foram fabricadas 03 misturas asfálticas recicladas com RAP e 02 misturas asfálticas sem adição de RAP:

❑ **QUENTE-0%RAP (referência):** mistura asfáltica a quente sem RAP

❑ **MORNA-0%RAP:** mistura asfáltica morna sem RAP

❑ **QUENTE-10%RAP:** mistura asfáltica a quente com 10% de RAP

❑ **MORNA-10%RAP:** mistura asfáltica morna com 10% de RAP

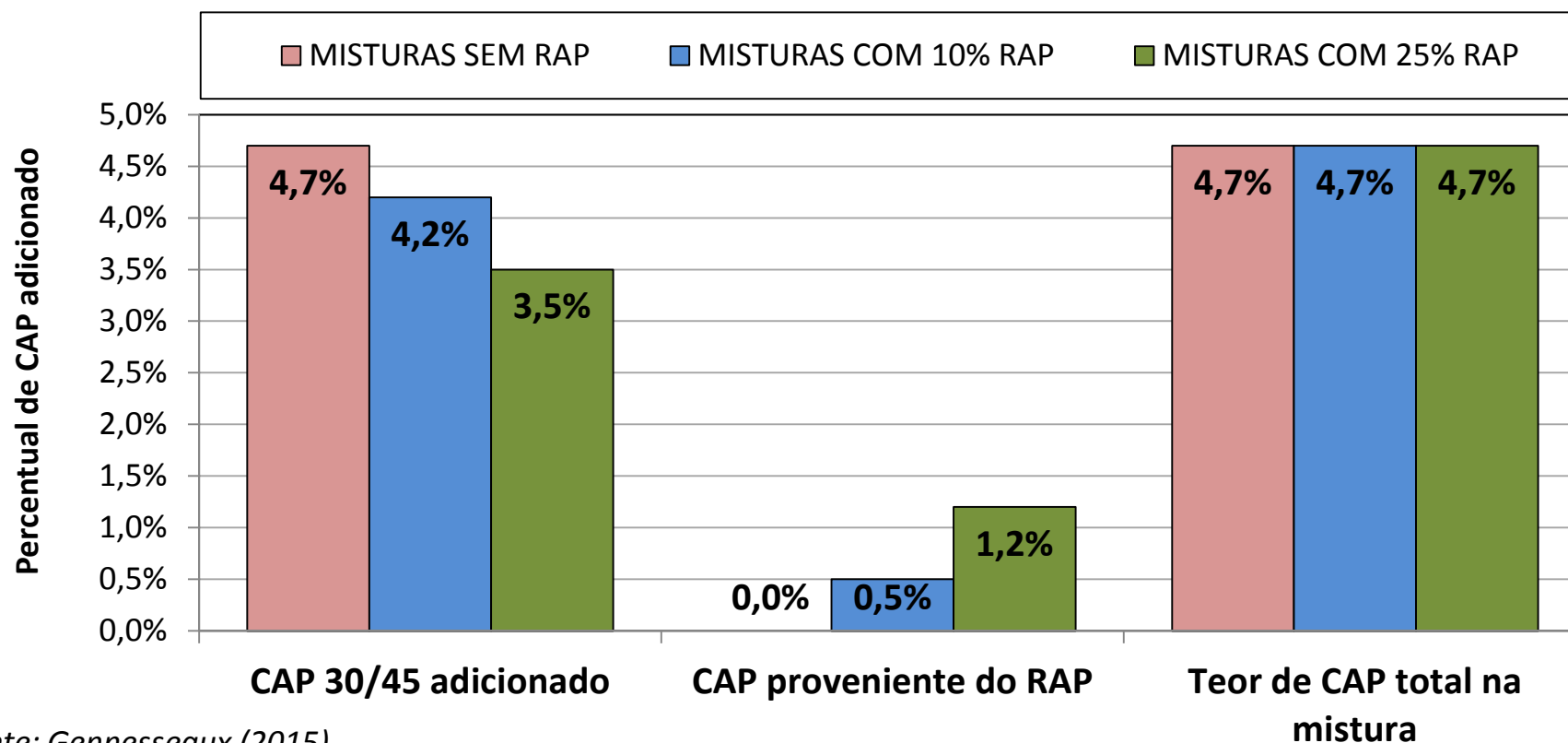
❑ **MORNA-25%RAP:** mistura asfáltica morna com 25% de RAP

Fonte: Genesseeaux (2015)

RECICLAGEM MORNA – ESTUDO DE CASO (USP)

Projeto de Dosagem

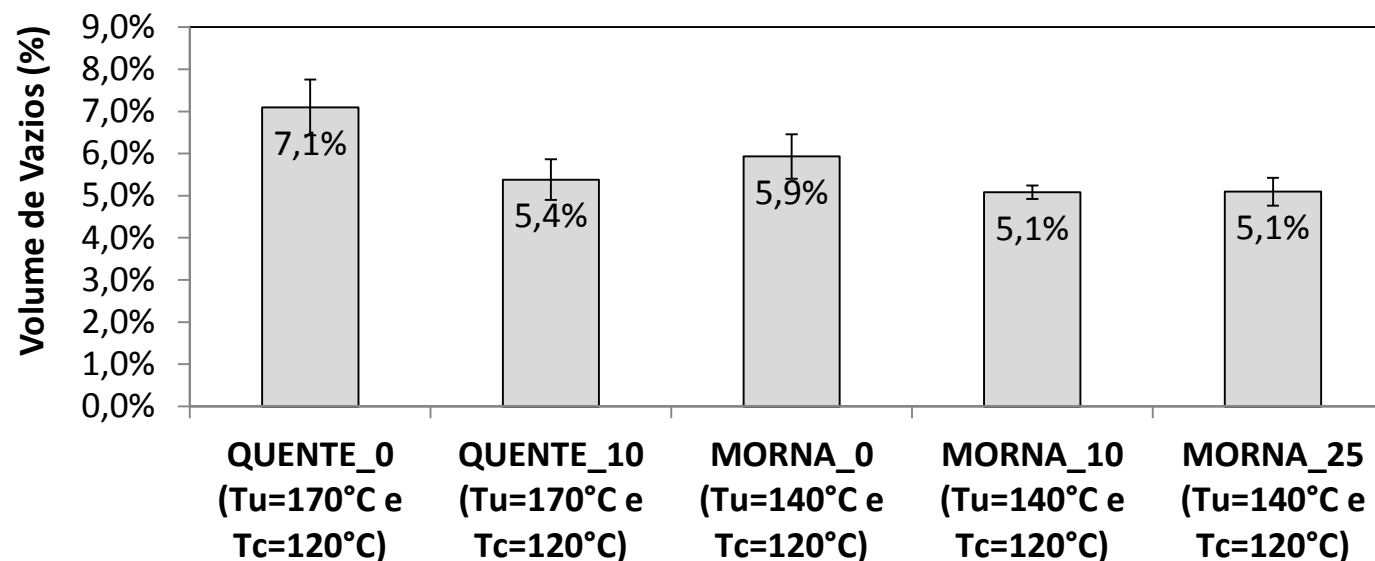
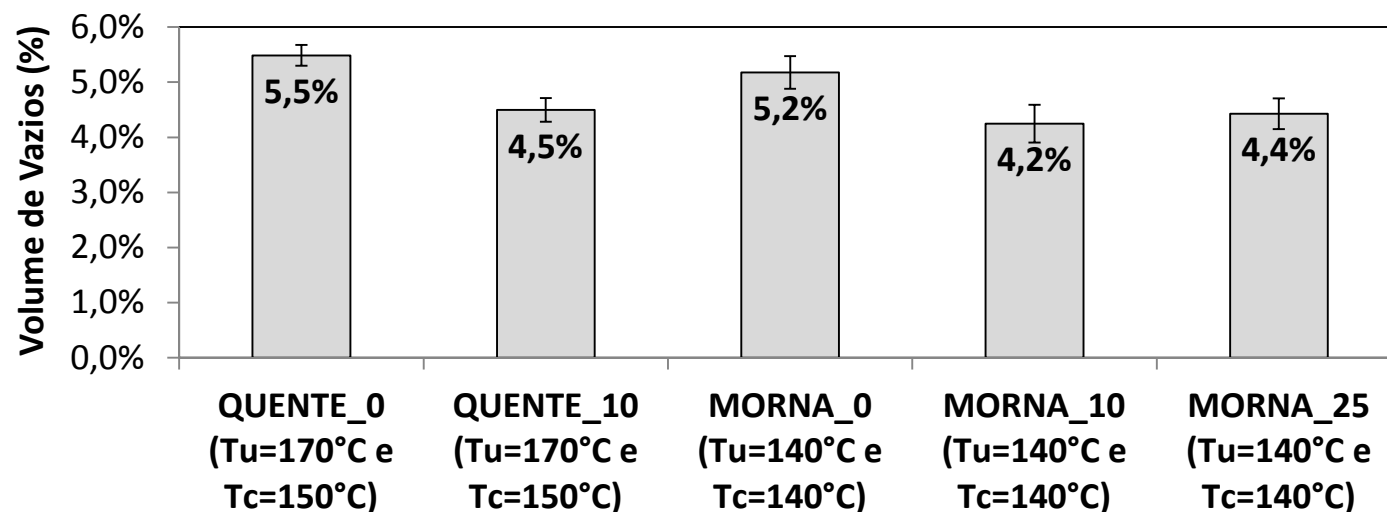
- ☐ Para a dosagem das misturas asfálticas contendo RAP, **todo o CAP proveniente do RAP** (no caso 5,0%) foi considerado, proporcionando uma **redução na quantidade de CAP 30/45 novo** adicionado para complementar o **teor de ligante de projeto de 4,7%**.



Fonte: Genesseeaux (2015)

RECICLAGEM MORNA – ESTUDO DE CASO (USP)

Volume de Vazios

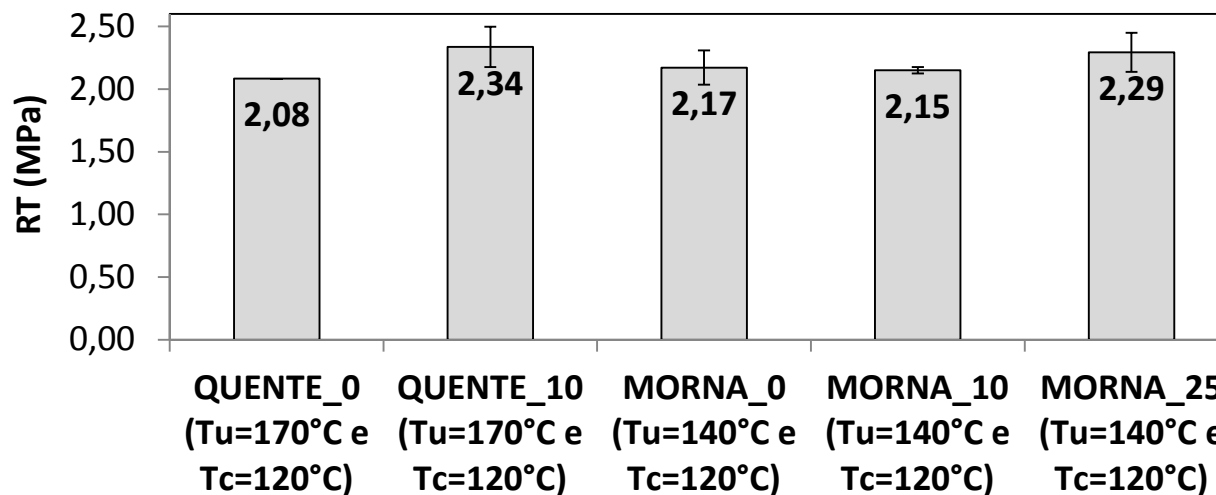
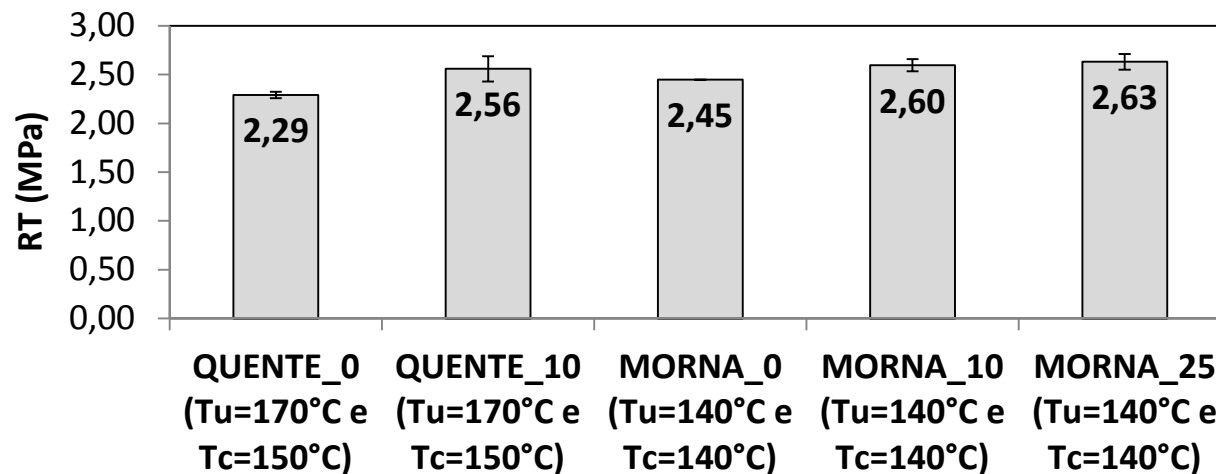


Fonte: Genesseaux (2015)

RECICLAGEM MORNA – ESTUDO DE CASO (USP)

Resistência à Tração por Compressão Diametral

ABNT NBR 15087/2004

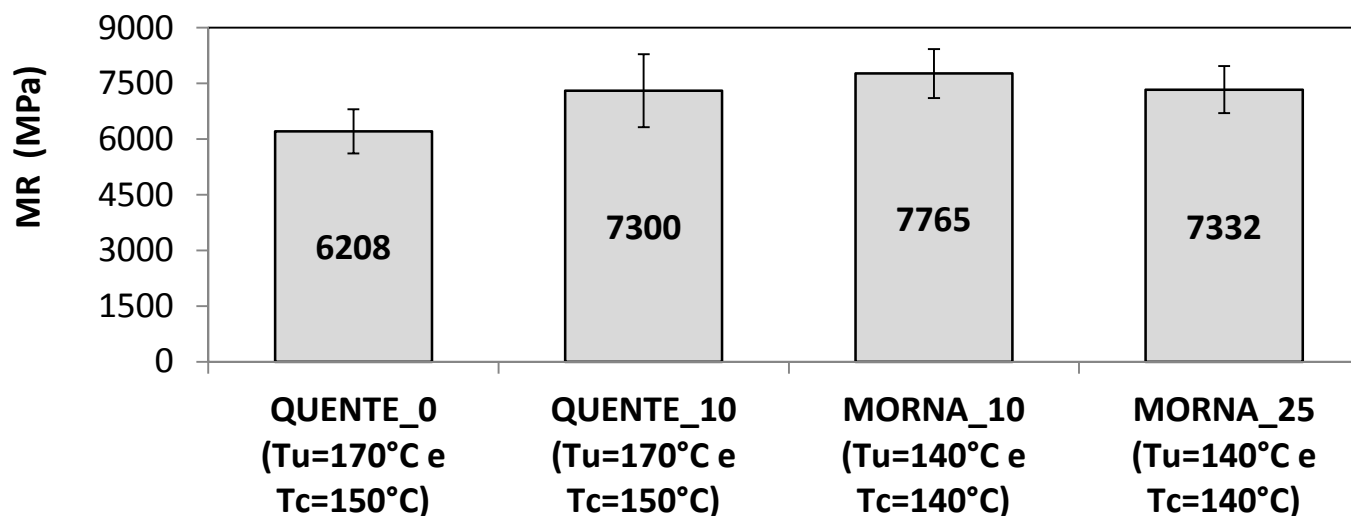
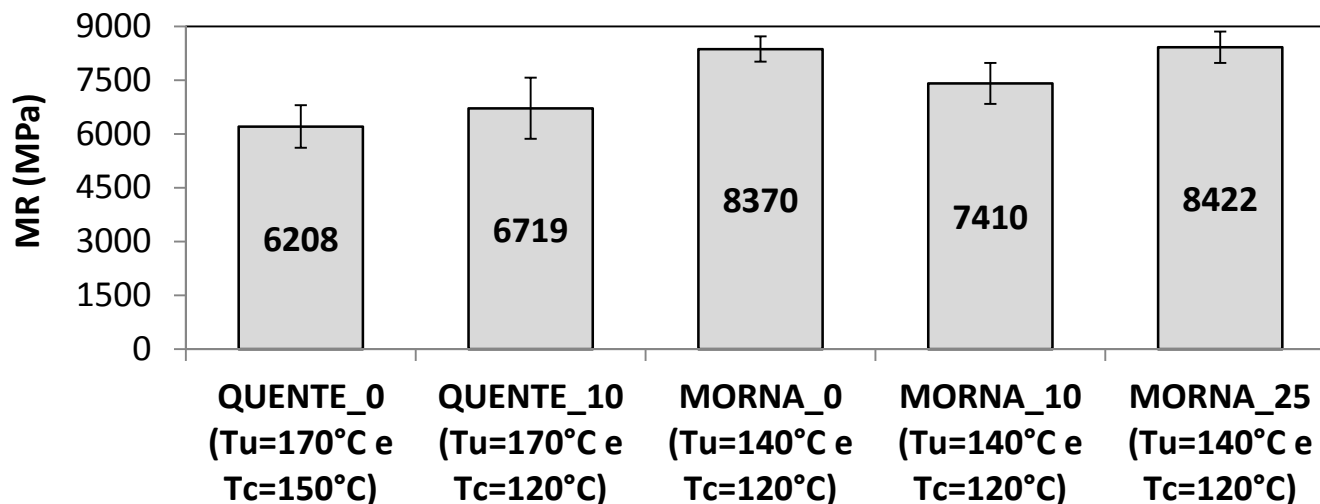


Fonte: Genesseeux (2015)

RECICLAGEM MORNA – ESTUDO DE CASO (USP)

Módulo de Resiliência

ABNT NBR 16018 (2011)



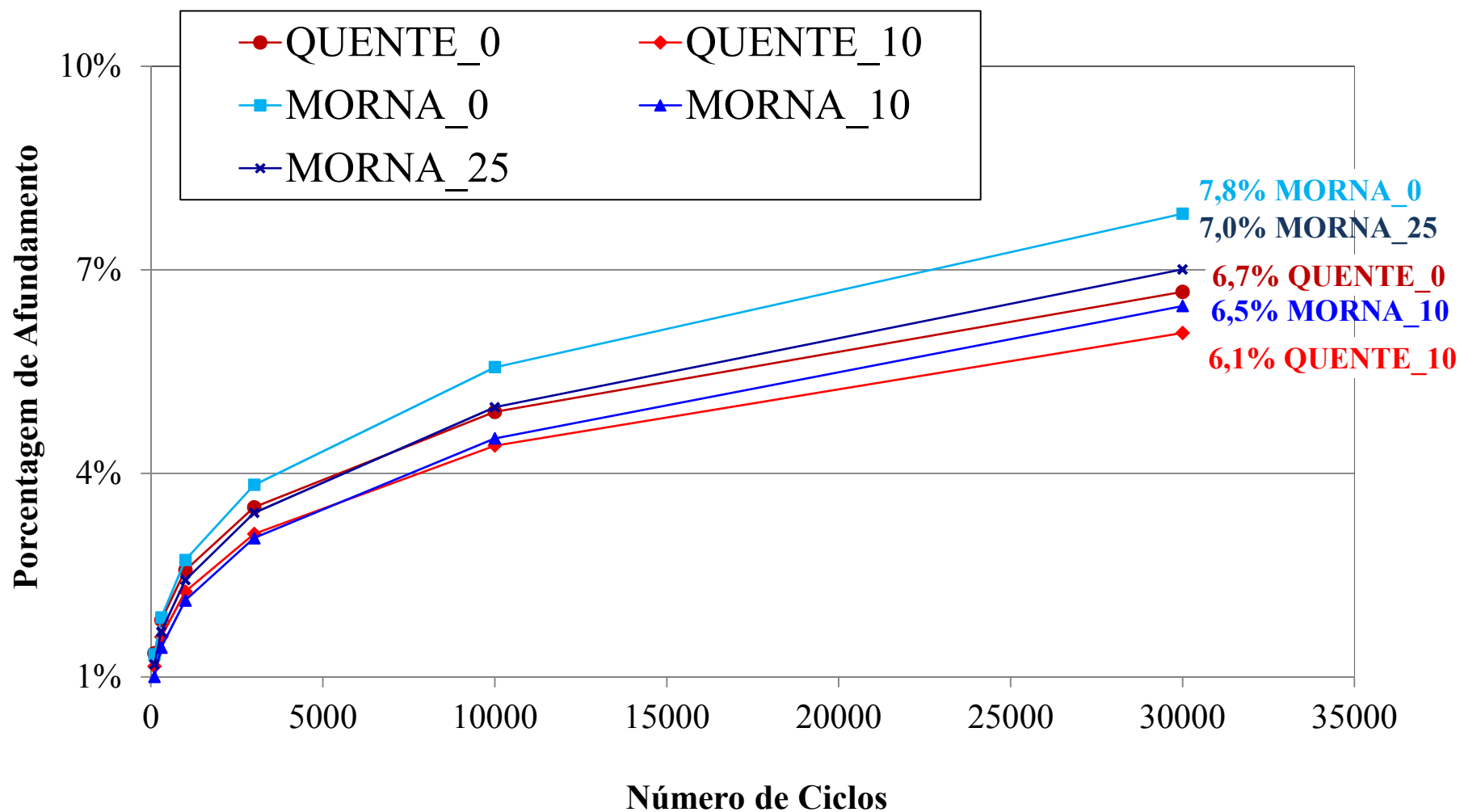
prensa hidráulica
MTS 810



Fonte: Genesseaux (2015)

RECICLAGEM MORNA – ESTUDO DE CASO (USP)

Afundamento em Trilha de Roda

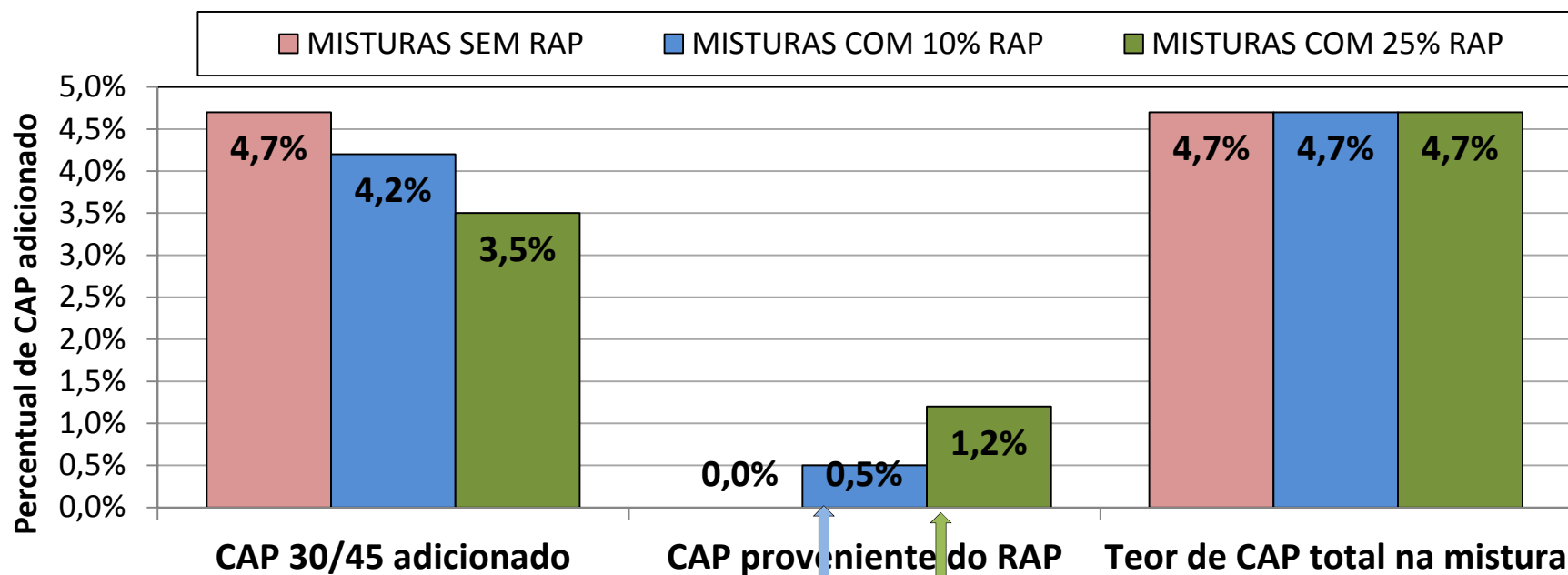


Fonte: Genesseaux (2015)

RECICLAGEM MORNA – ESTUDO DE CASO (USP)

Análise de Custos

- ❑ Para a dosagem das misturas asfálticas contendo RAP, **todo o CAP proveniente do RAP** (no caso 5,0%) foi considerado, proporcionando uma **redução na quantidade de CAP 30/45 novo** adicionado para complementar o teor de ligante de projeto de 4,7%.



Misturas com 10% de RAP → economia de:

- 10,2% do custo total do CAP
- 8,4% do custo dos agregados novos
- 9,6% no valor final da mistura asfáltica.

Misturas com 25% de RAP → economia de:

- 25,7% do custo total do CAP
- 21,2% do custo dos agregados novos
- 24,2% no valor final da mistura asfáltica.

RECICLAGEM PROFUNDA

**PAVIMENTOS
MUITO
DETERIORADOS**



**QUANTO DEVE SER
FRESADO????**

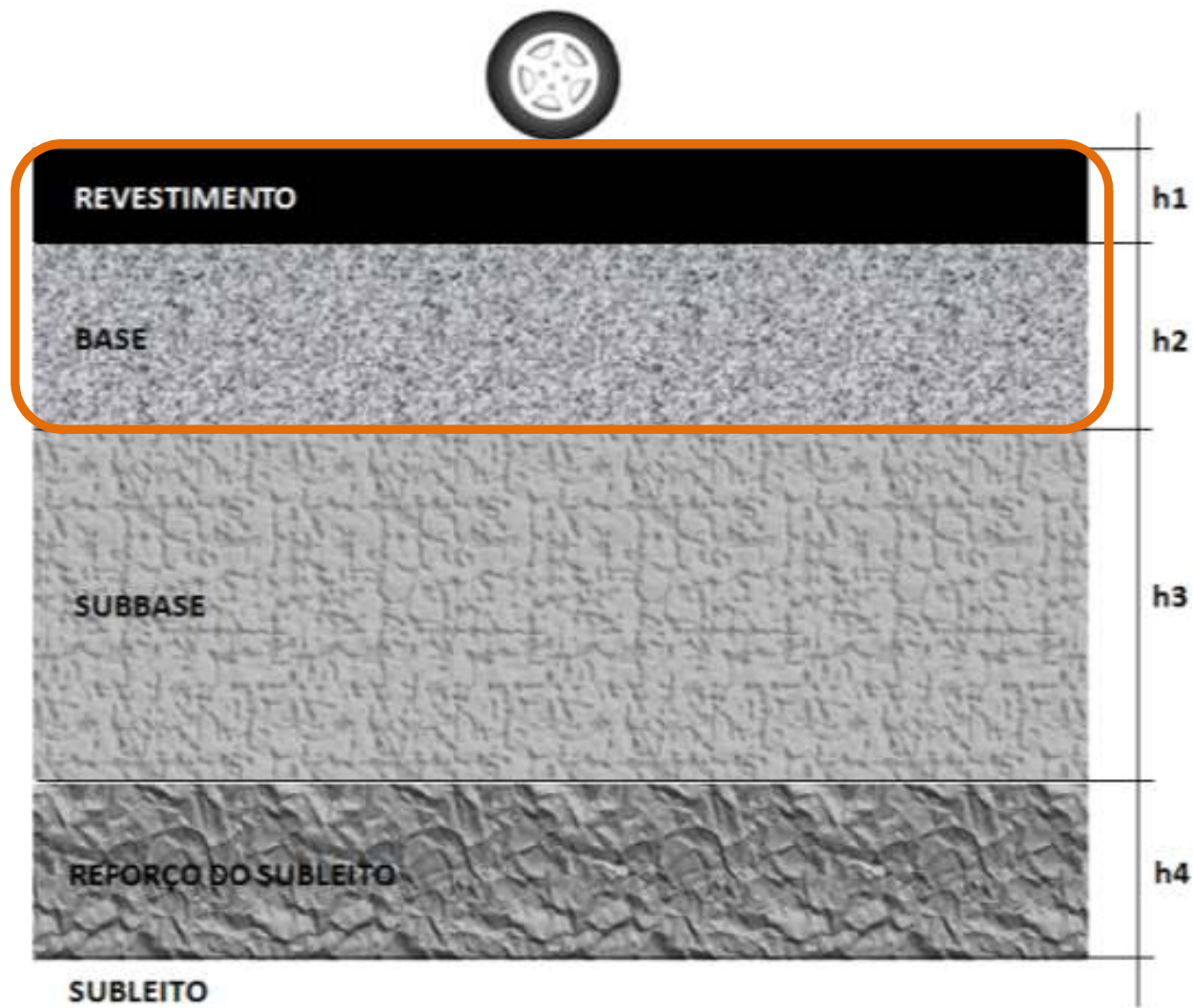
**SOMENTE O
REVESTIMENTO É
SUFICIENTE????**

RECICLAGEM PROFUNDA



PROBLEMAS ESTRUTURAIS → NECESSIDADE DE RETIRADA DE UMA
MAIOR ESPESSURA DE PAVIMENTO → **RECICLAGEM PROFUNDA**

RECICLAGEM PROFUNDA



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)



Trecho entre **São Paulo** e **Belo Horizonte** (sentido São Paulo)

Entre km 641,5 e km 642,3

**RECICLAGEM DE
REVESTIMENTO ASFÁLTICO
COM EMULSÃO**

+

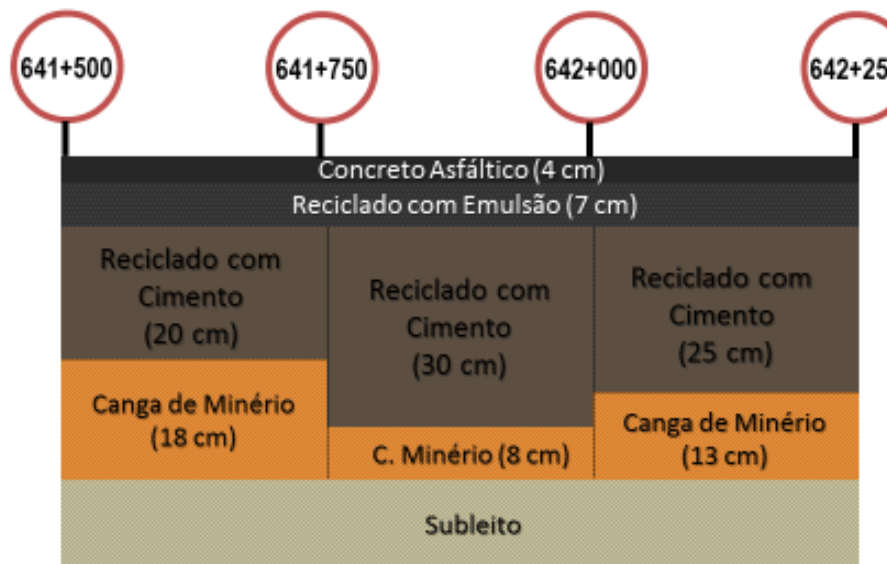
**RECICLAGEM DE BASE
GRANULAR COM CIMENTO**

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

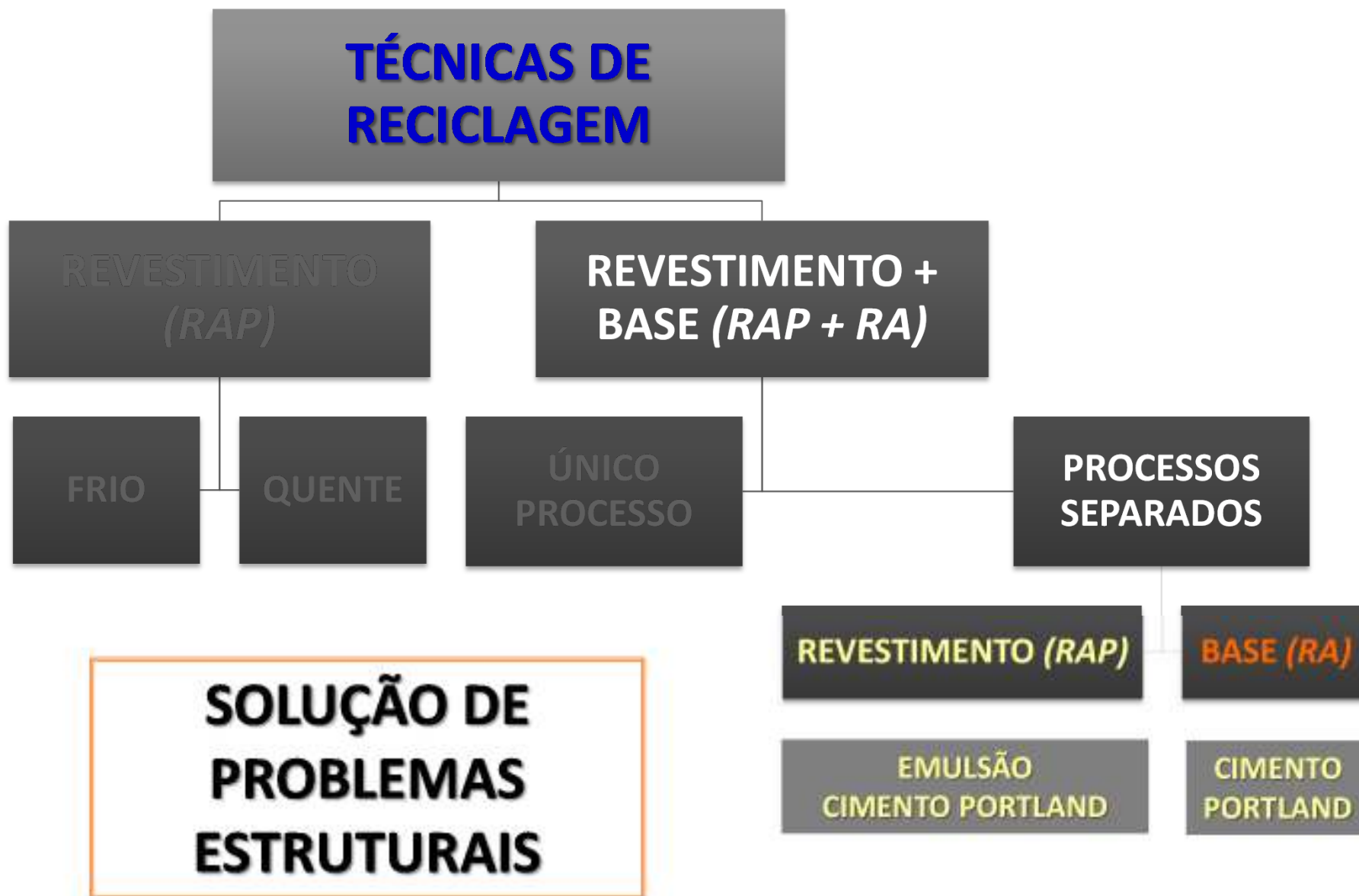
PAVIMENTO EXISTENTE



PROJETO DE RESTAURAÇÃO



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Reciclagem de Revestimento Asfáltico com Emulsão

**QUE FATORES
INFLUENCIAM A
RECICLAGEM DO
REVESTIMENTO
COM ADIÇÃO DE
EMULSÃO?**

- ✓ **Relação entre teor de água e teor de emulsão**
- ✓ **Características do agregado fresado (RAP)**
- ✓ **Aplicação sobre camadas com diferentes capacidades de suporte**

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Reciclagem de Revestimento Asfáltico com Emulsão

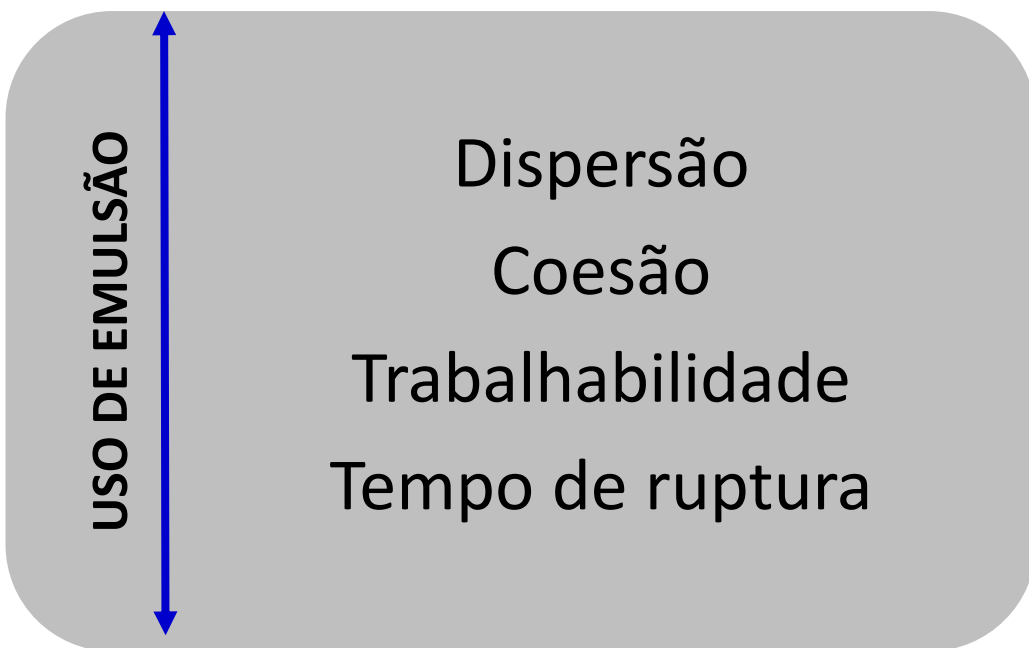
Revestimento Deteriorado Fresado e Selecionado

- ✓ Adição de 1 % de Cimento
- ✓ 3% de Água
- ✓ 3% de Emulsão Modificada por Polímero

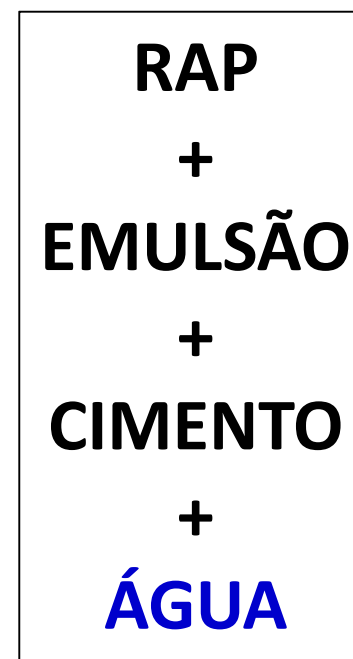


RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Reciclagem de Revestimento Asfáltico com Emulsão



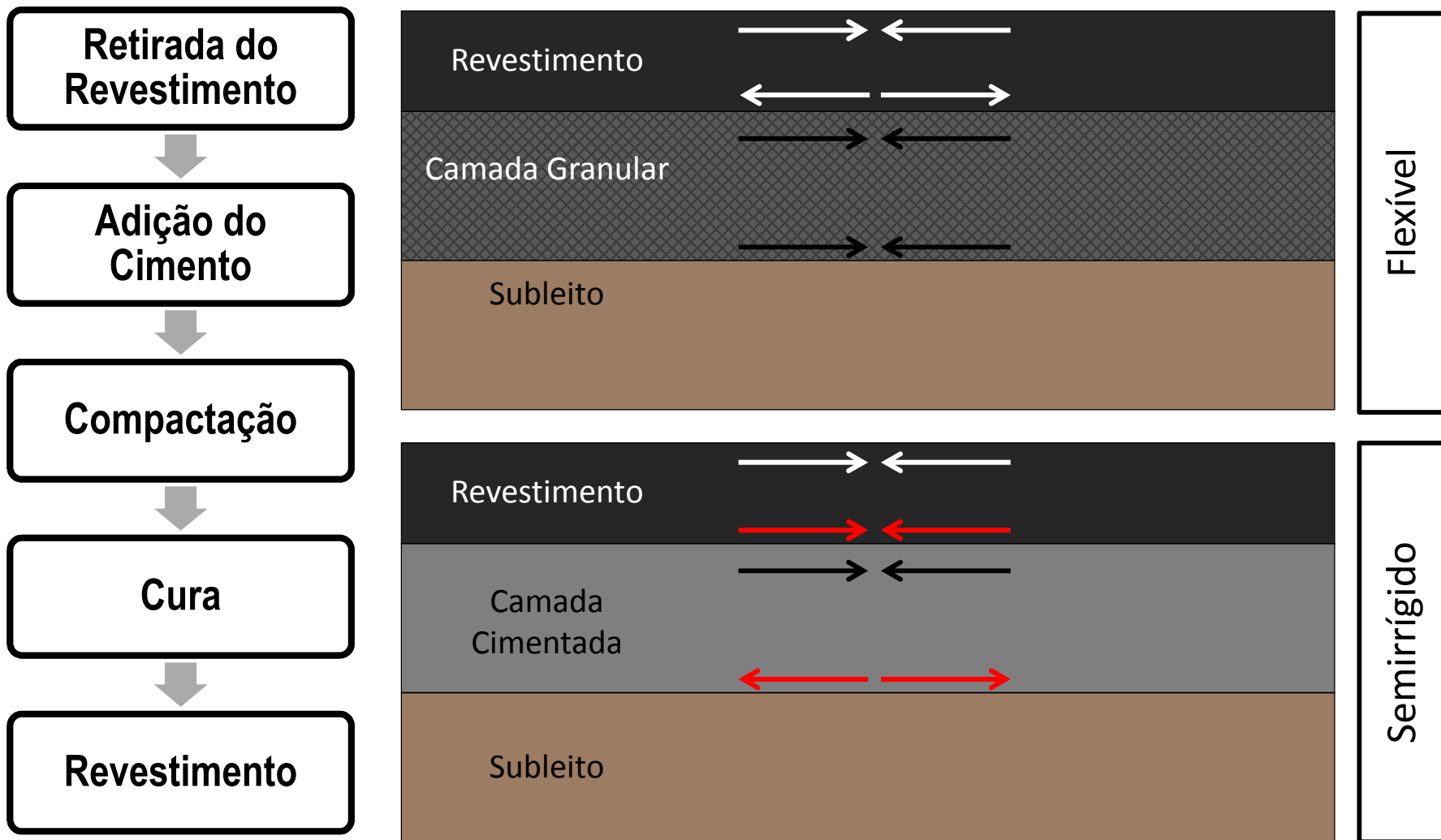
Reações de HIDRATAÇÃO
do cimento → necessita
da presença da água



CURA de misturas
emulsionadas → saída da
água leva a melhoria nas
propriedades mecânicas

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Reciclagem de Base com Cimento



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Reciclagem de Base com Cimento

**QUE FATORES
INFLUENCIAM
A RECICLAGEM
DE UMA BASE
(DE SOLO-
BRITA) COM
ADIÇÃO DE
CIMENTO?**

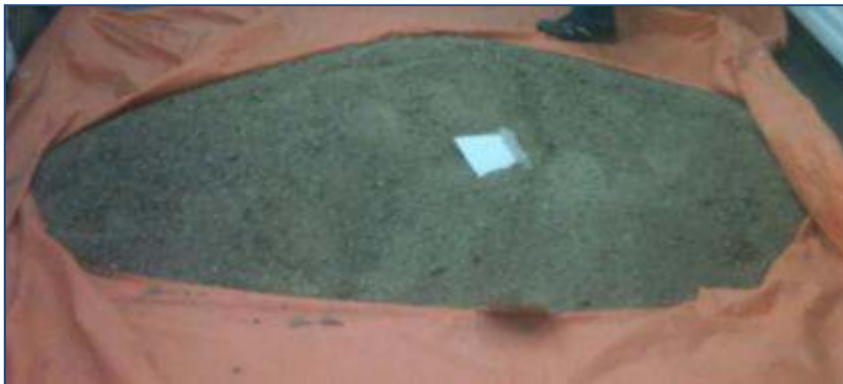
- ✓ **Características do agregado**
- ✓ **Características do solo**
 - ✓ **Teor de cimento**
 - ✓ **Teor de umidade**
- ✓ **Espessura da camada**
- ✓ **Grau de compactação**

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Reciclagem de Base com Cimento

Mistura de Solo e Brita – Base do Pavimento Deteriorado

- ✓ Água para o Teor Ótimo de Compactação
- ✓ Adição de 5% de Cimento



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Reciclagem de Base com Cimento

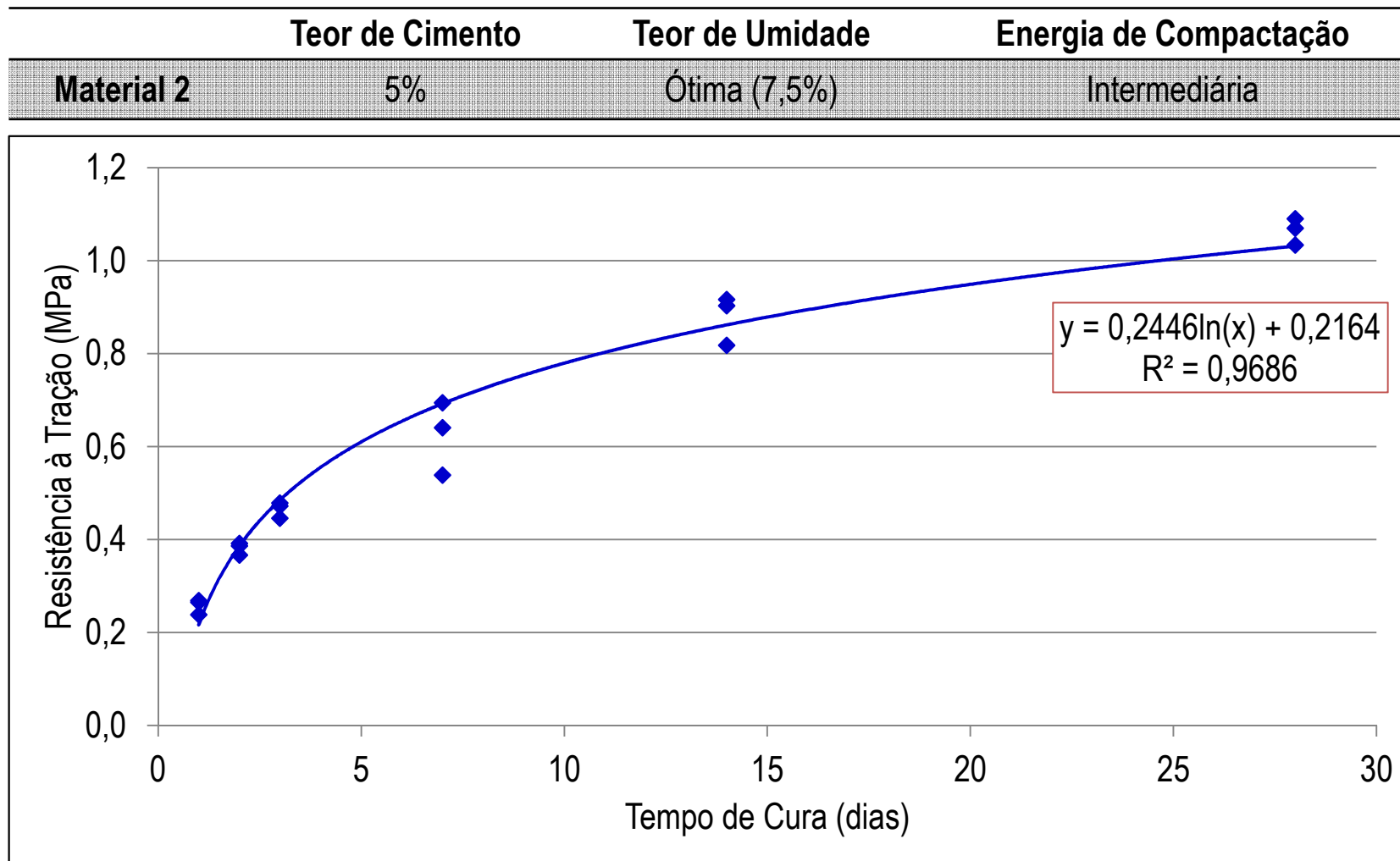
VARIABILIDADE DE MATERIAIS



ADEQUAÇÃO DA DOSAGEM

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Reciclagem de Base com Cimento



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

A Obra

RETIRADA DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO DETERIORADO



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

A Obra

APLICAÇÃO DO CIMENTO NA TAXA PRÉ-ESTABELECIDADA



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

A Obra

AJUSTE DA UMIDADE E MISTURA



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

A Obra

COMPACTAÇÃO



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

A Obra

EXECUÇÃO DA CAMADA RECICLADA COM EMULSÃO E DO CONCRETO ASFÁLTICO



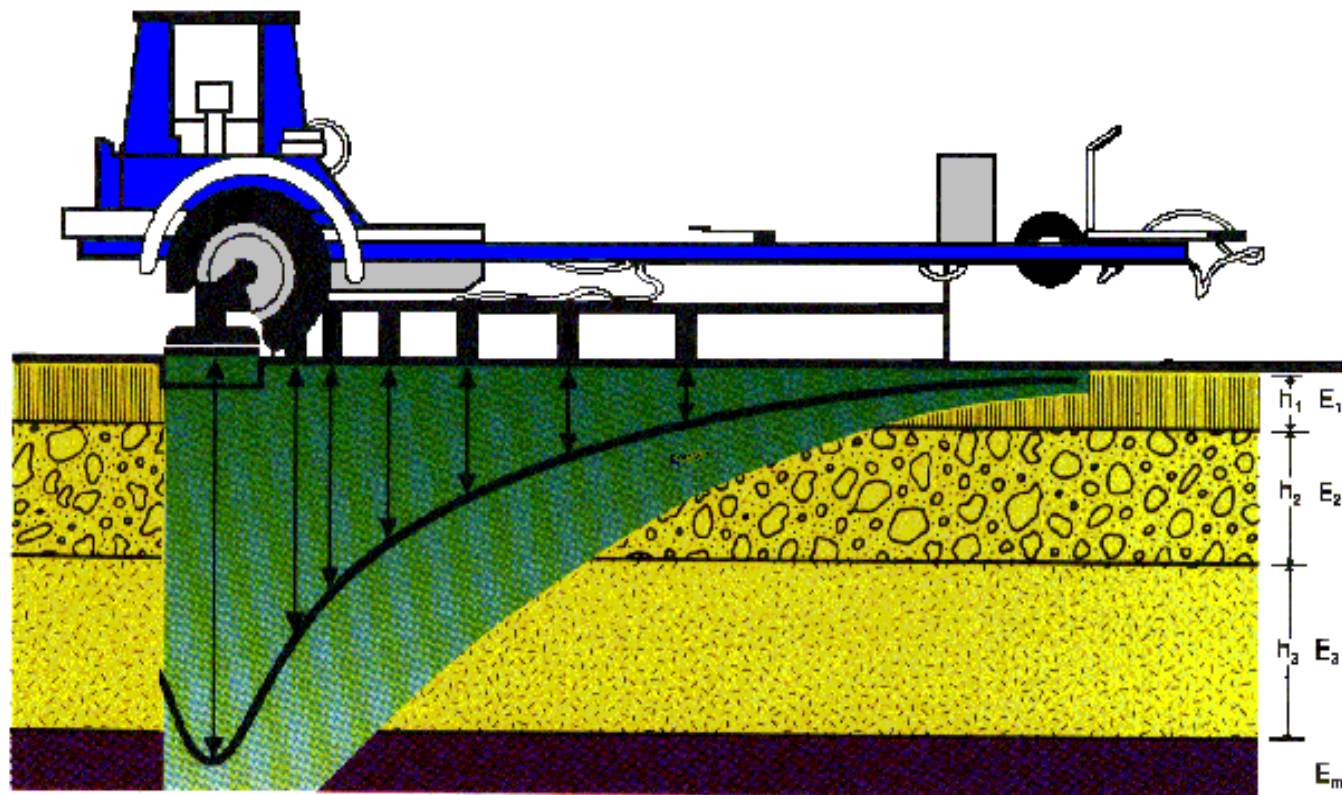
RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Desempenho em Campo - Levantamento Deflectométrico

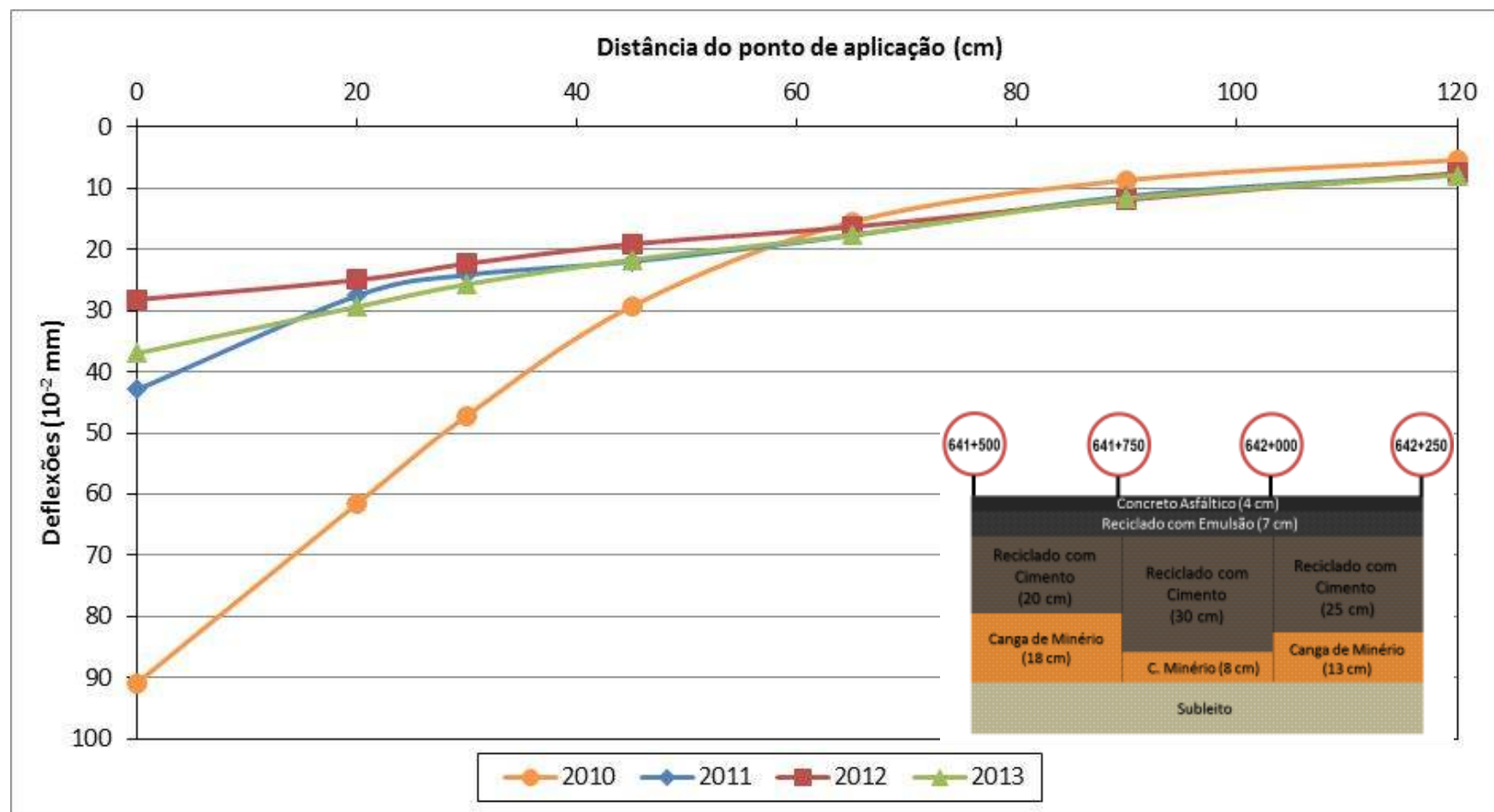
FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Levantamento Deflectométrico

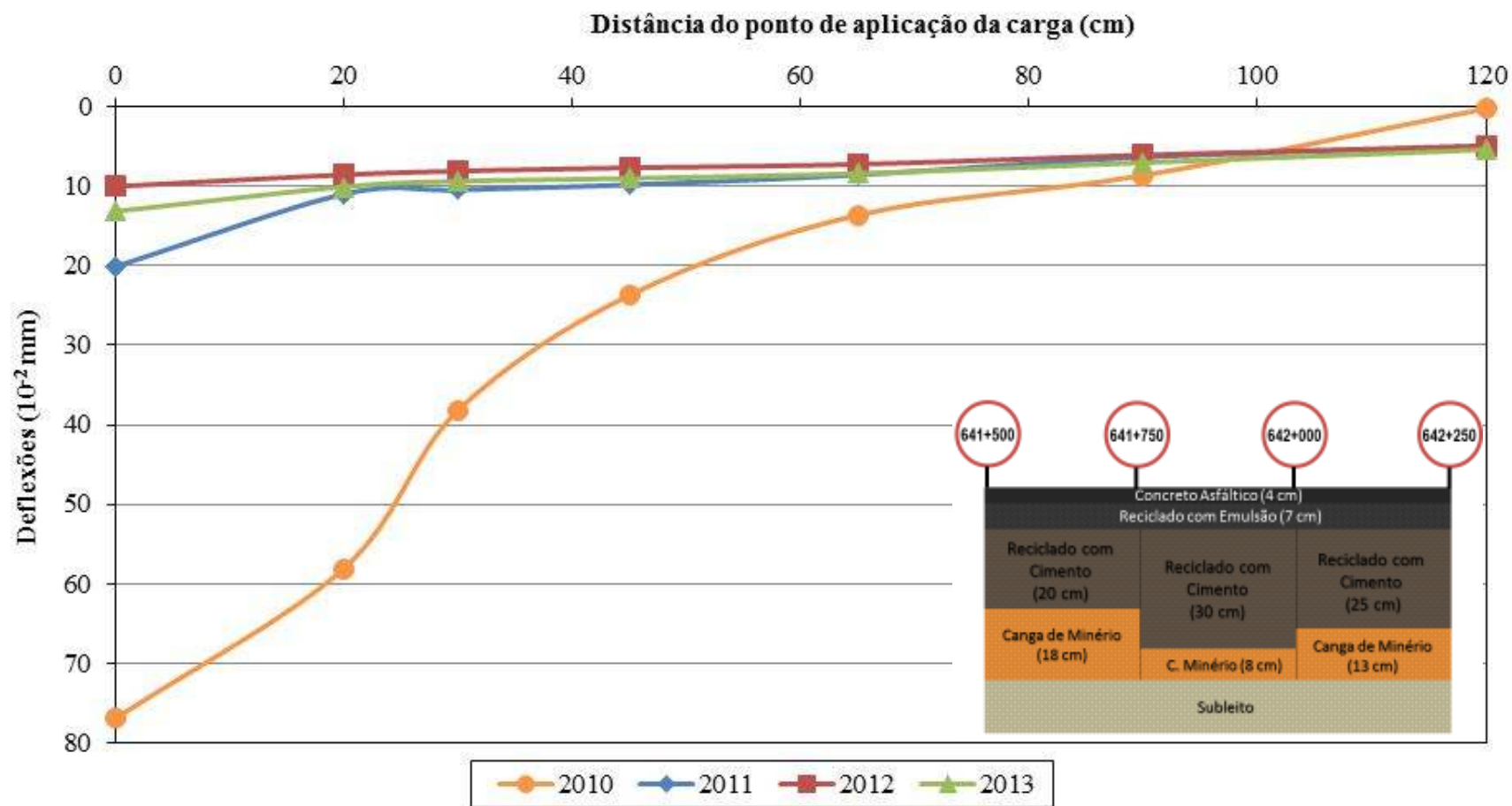
BASE RECICLADA COM 20cm



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Levantamento Deflectométrico

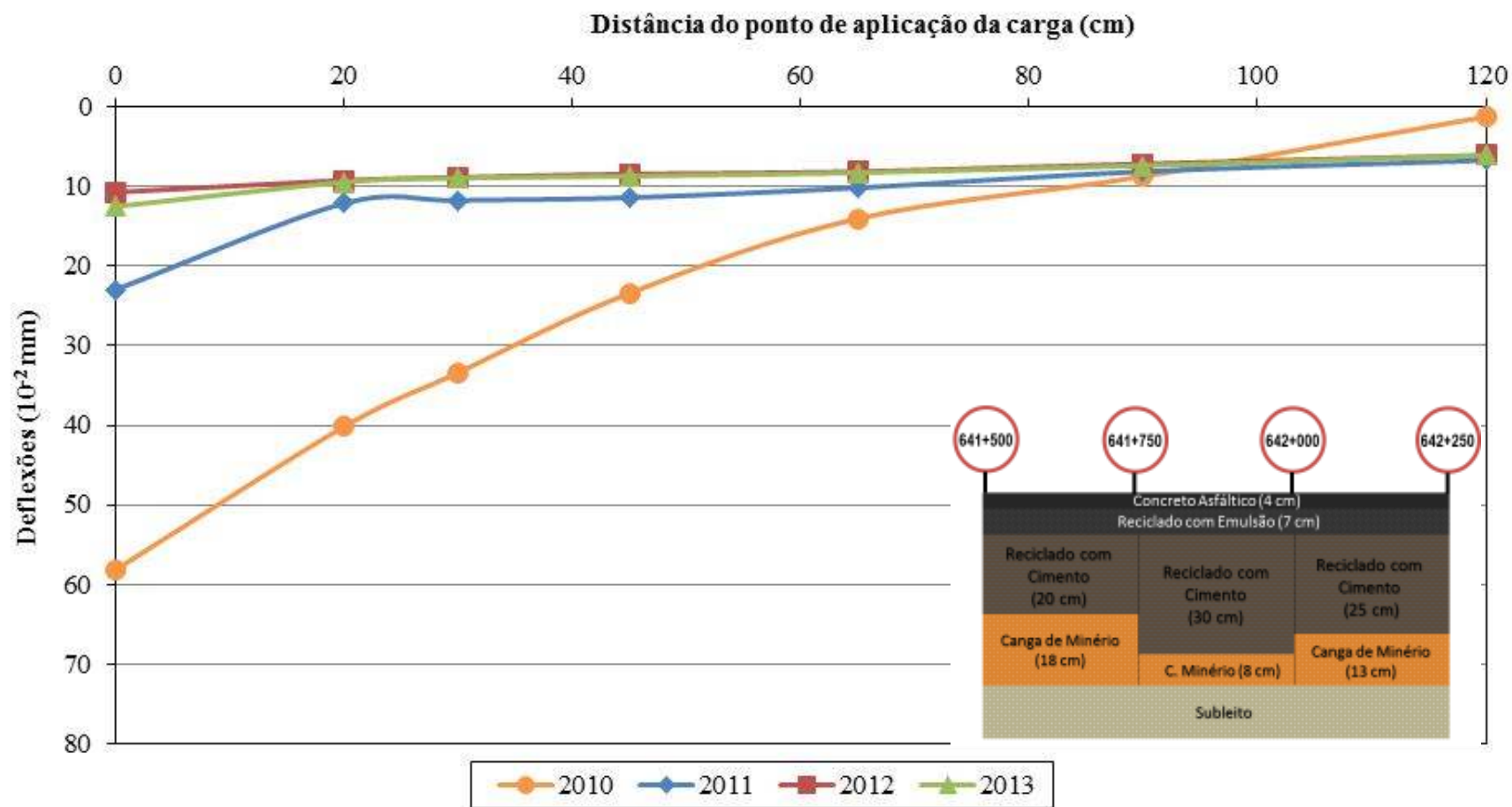
BASE RECICLADA COM 25cm



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO (USP)

Levantamento Deflectométrico

BASE RECICLADA COM 30cm



**RECICLAGEM DE
REVESTIMENTO ASFÁLTICO E
BASE CIMENTADA COM
ESPUMA DE ASFALTO**

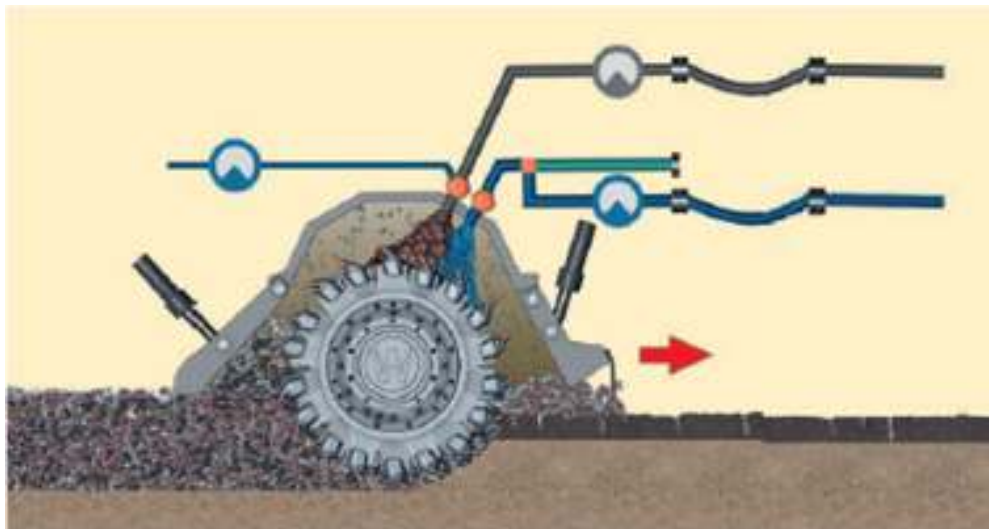
RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Reciclagem com Espuma de Asfalto

USINA

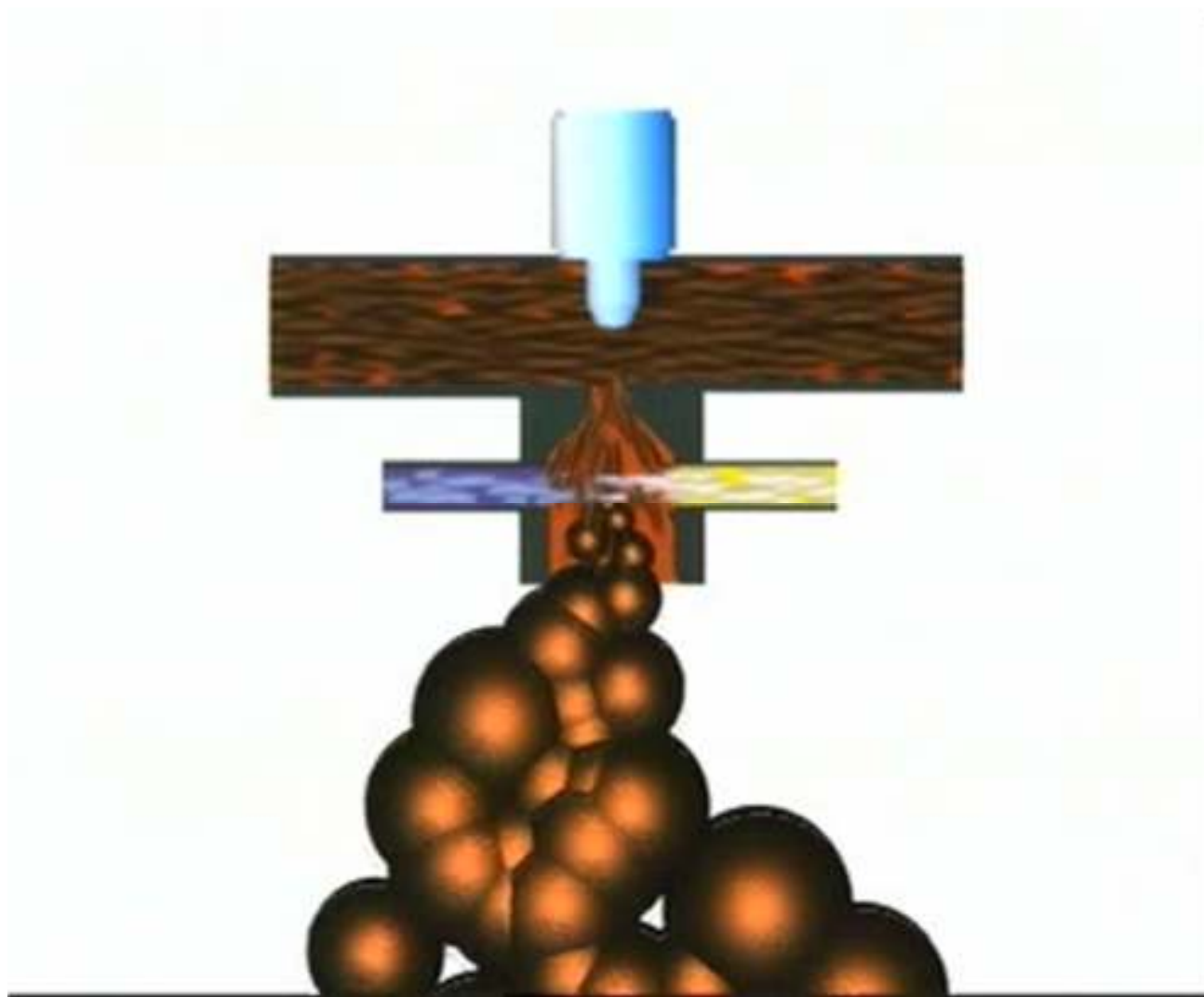


IN-SITU



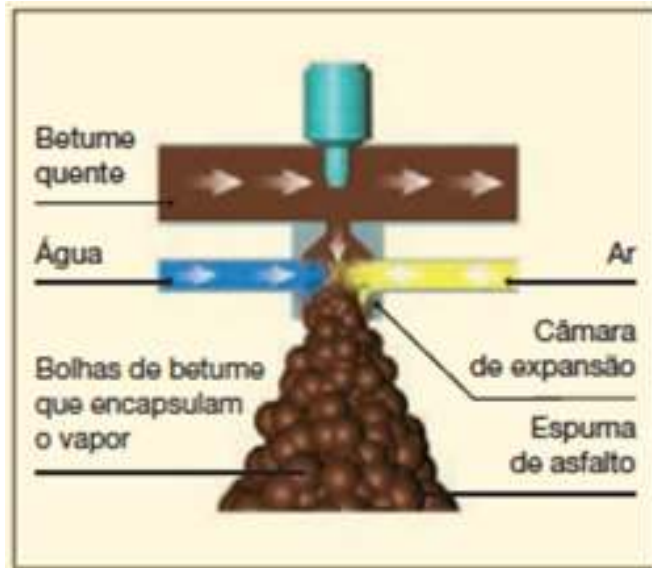
RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Processo de Formação da Espuma de Asfalto

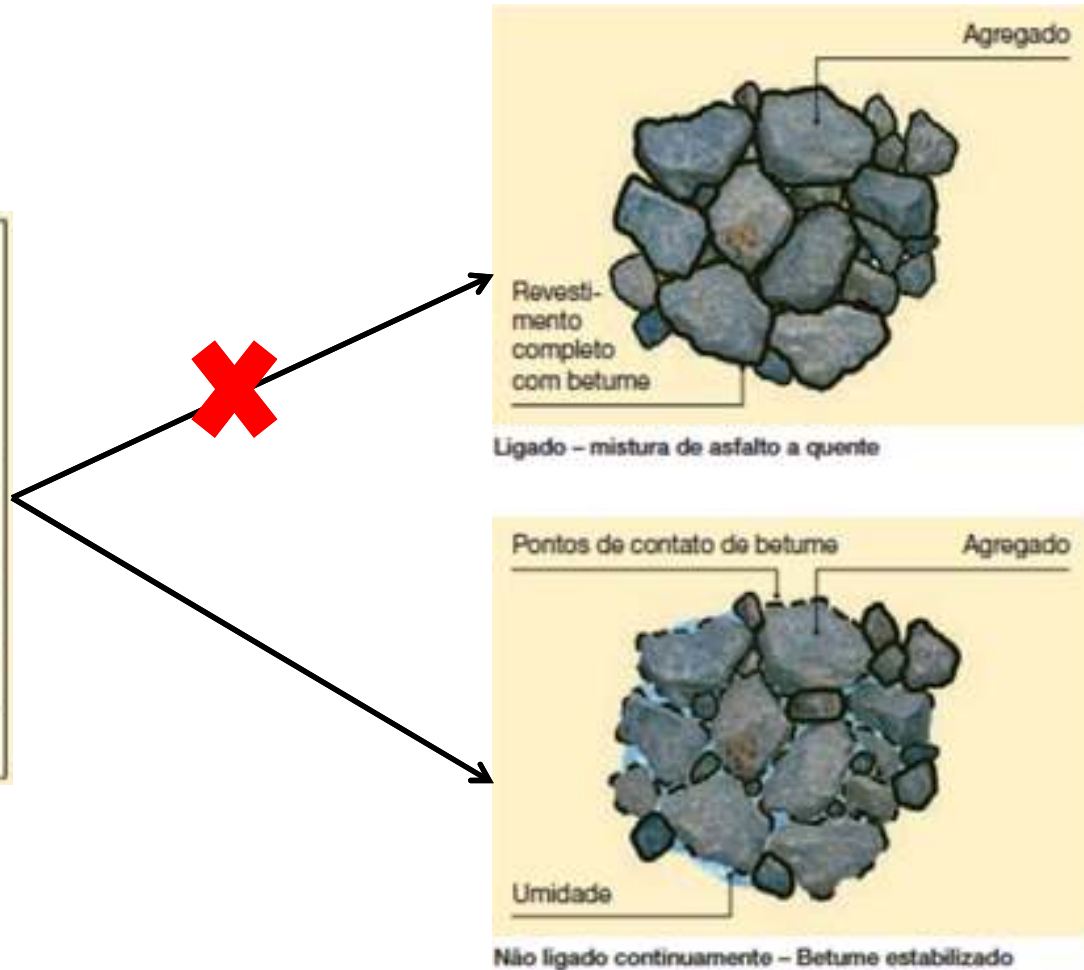


RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Processo de Formação da Espuma de Asfalto



Wirtgen (2012)



Wirtgen (2012)

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Aplicação

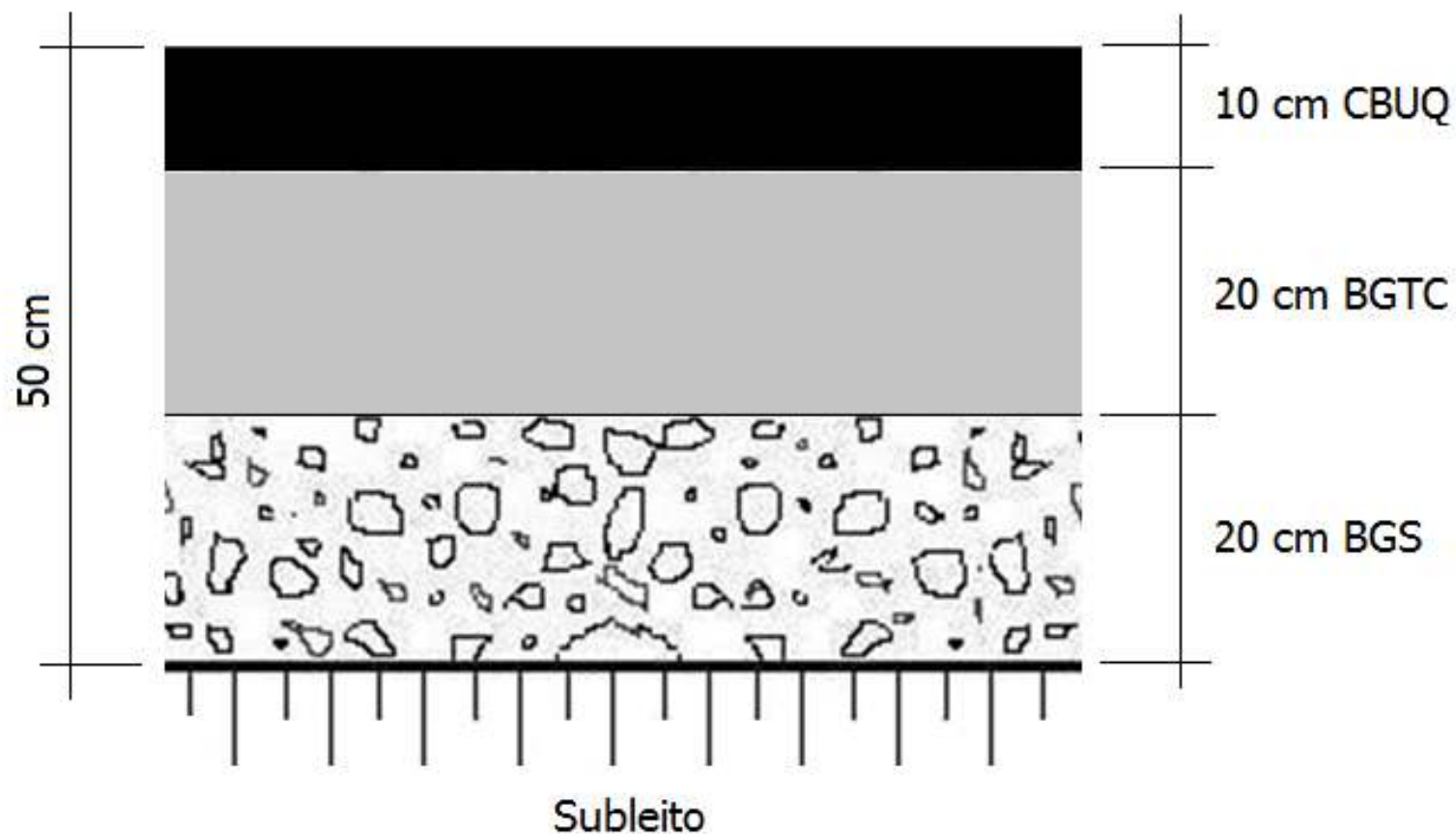


Fonte: Bomfim (2013)



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

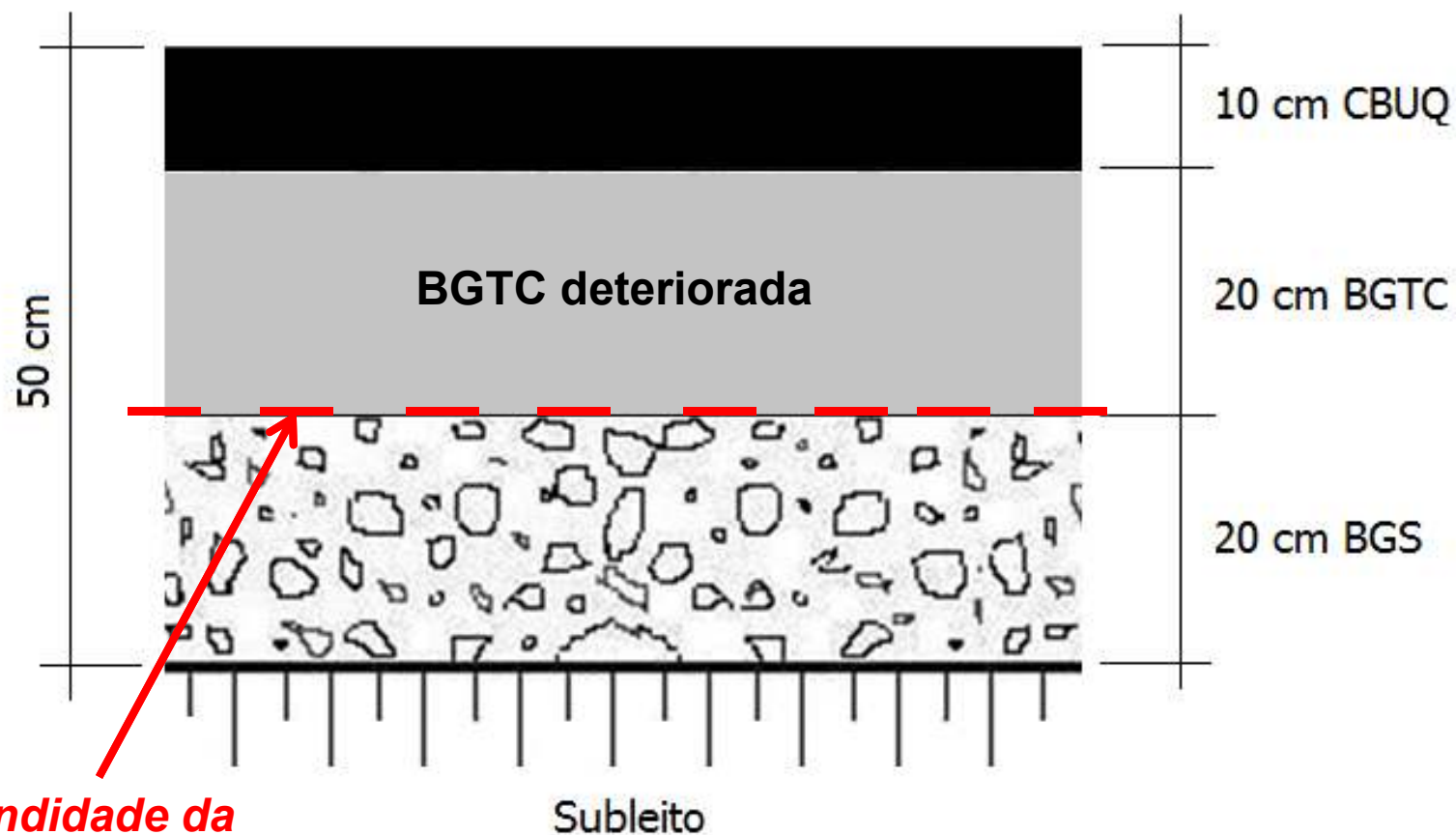
Seção Transversal Existente



Fonte: Bomfim (2013)

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Restauração

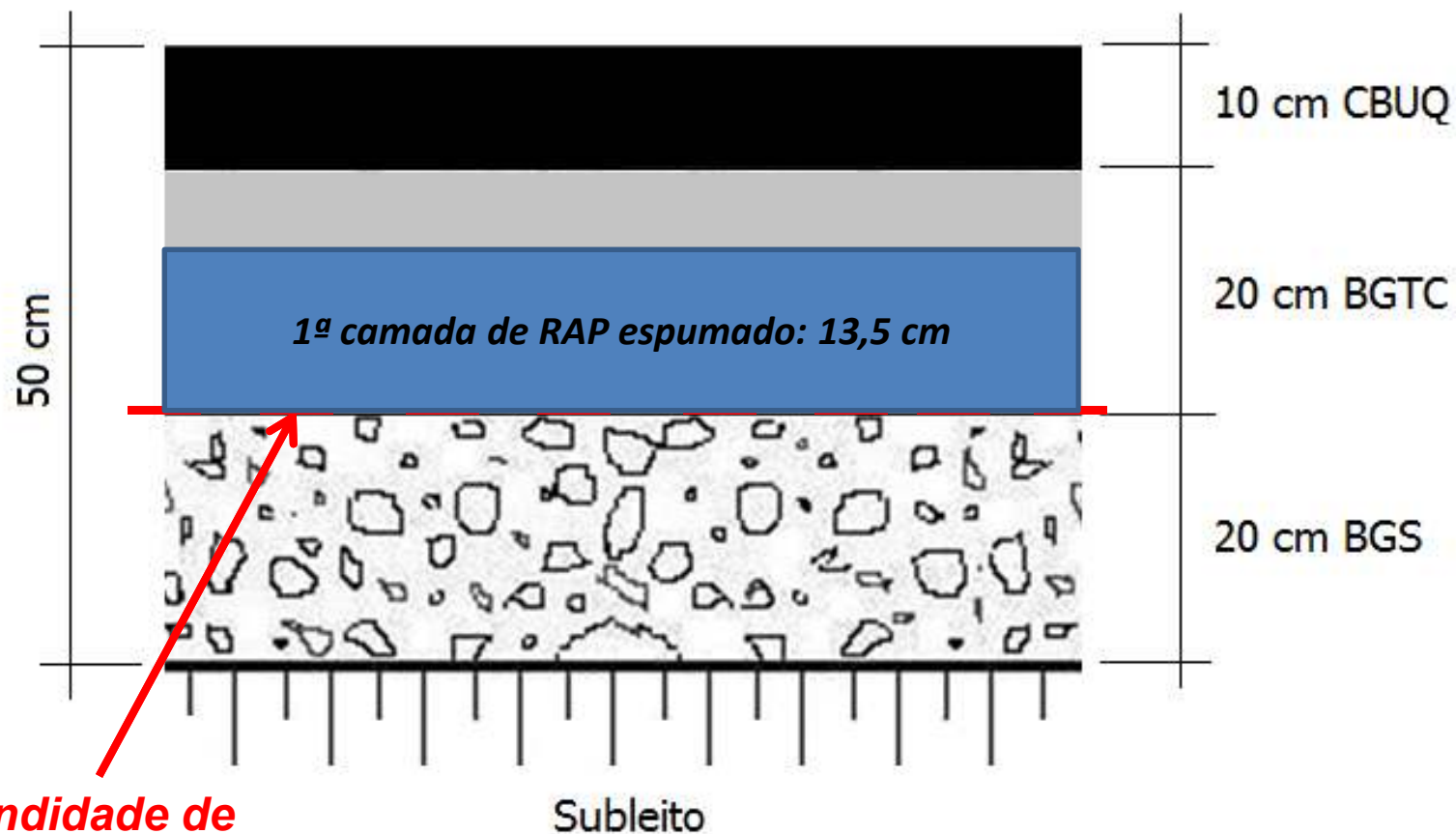


Profundidade da fresagem: 30 cm

Fonte: Bomfim (2013)

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Restauração

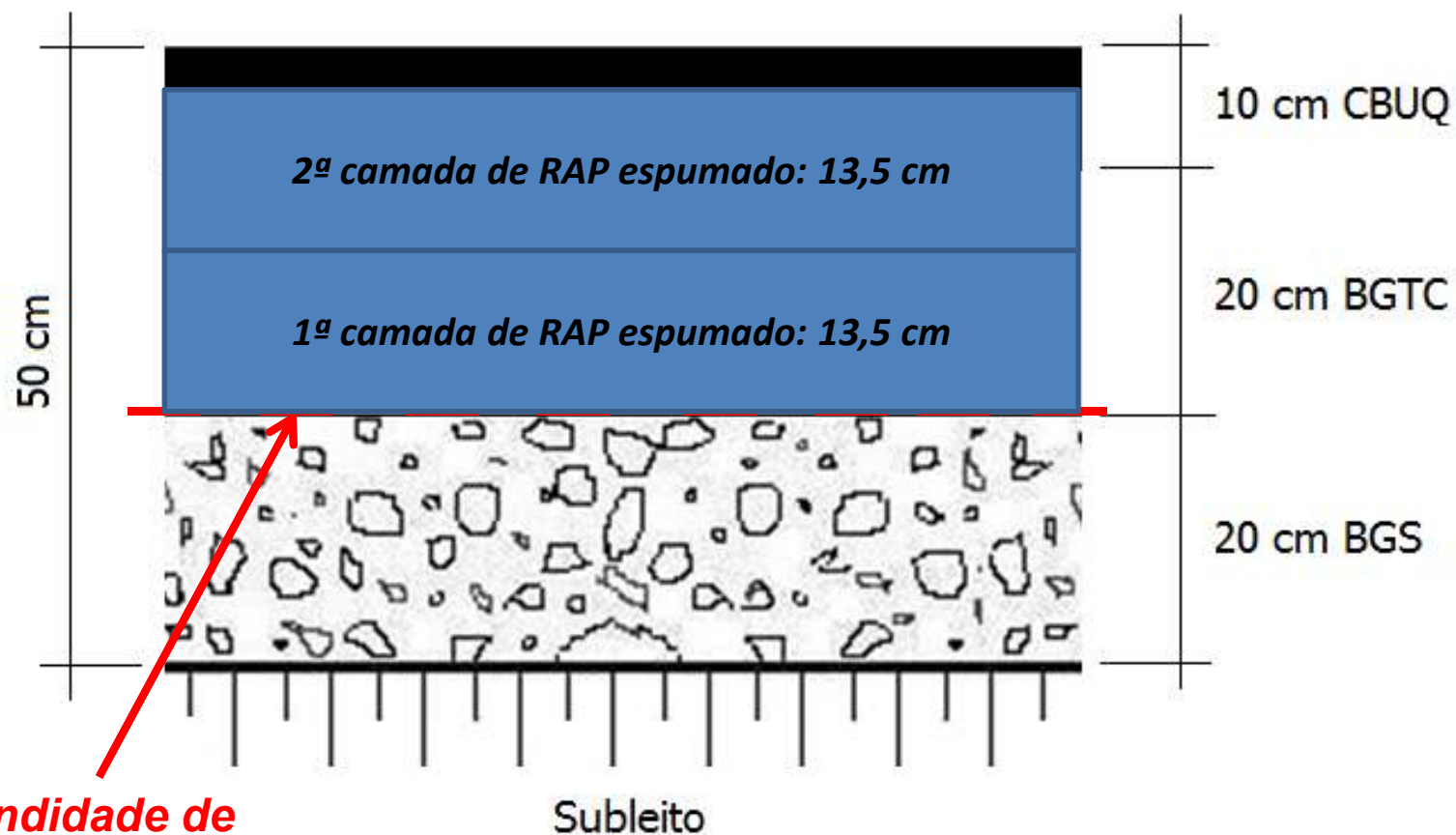


Profundidade de corte do projeto

Fonte: Bomfim (2013)

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Restauração

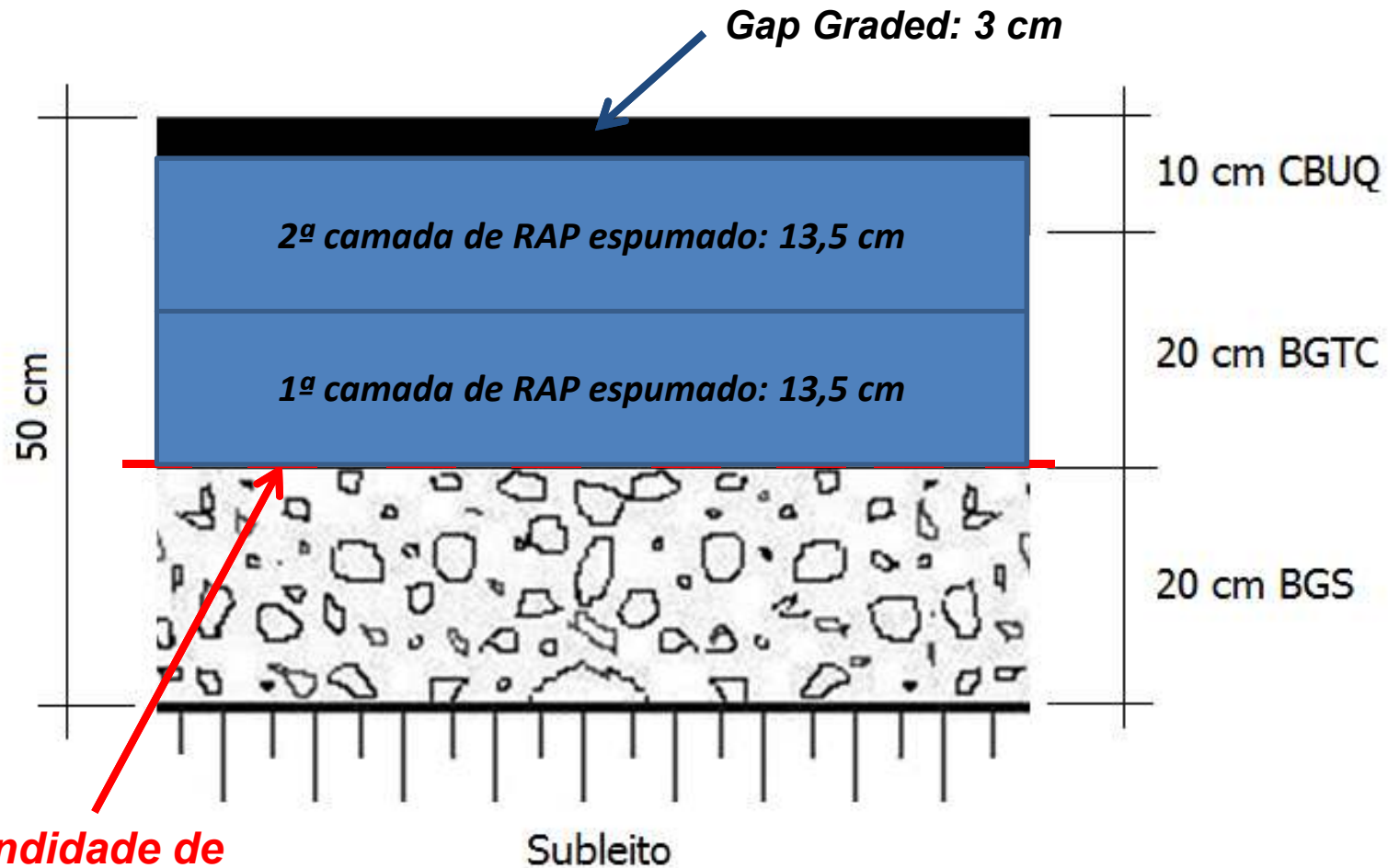


Profundidade de corte do projeto

Fonte: Bomfim (2013)

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Restauração



Profundidade de corte do projeto

Fonte: Bomfim (2013)

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Etapas de Execução da Obra

Fonte: Bomfim (2013)



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Etapas de Execução da Obra

Fonte: Bomfim (2013)



Fresagem do pavimento

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Etapas de Execução da Obra

Fonte: Bomfim (2013)



Fresagem do pavimento

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Etapas de Execução da Obra



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Etapas de Execução da Obra



RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Etapas de Execução da Obra

Fonte: Bomfim (2013)



*Aplicação da 2ª camada de RAP
espumado e compactação*

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Etapas de Execução da Obra

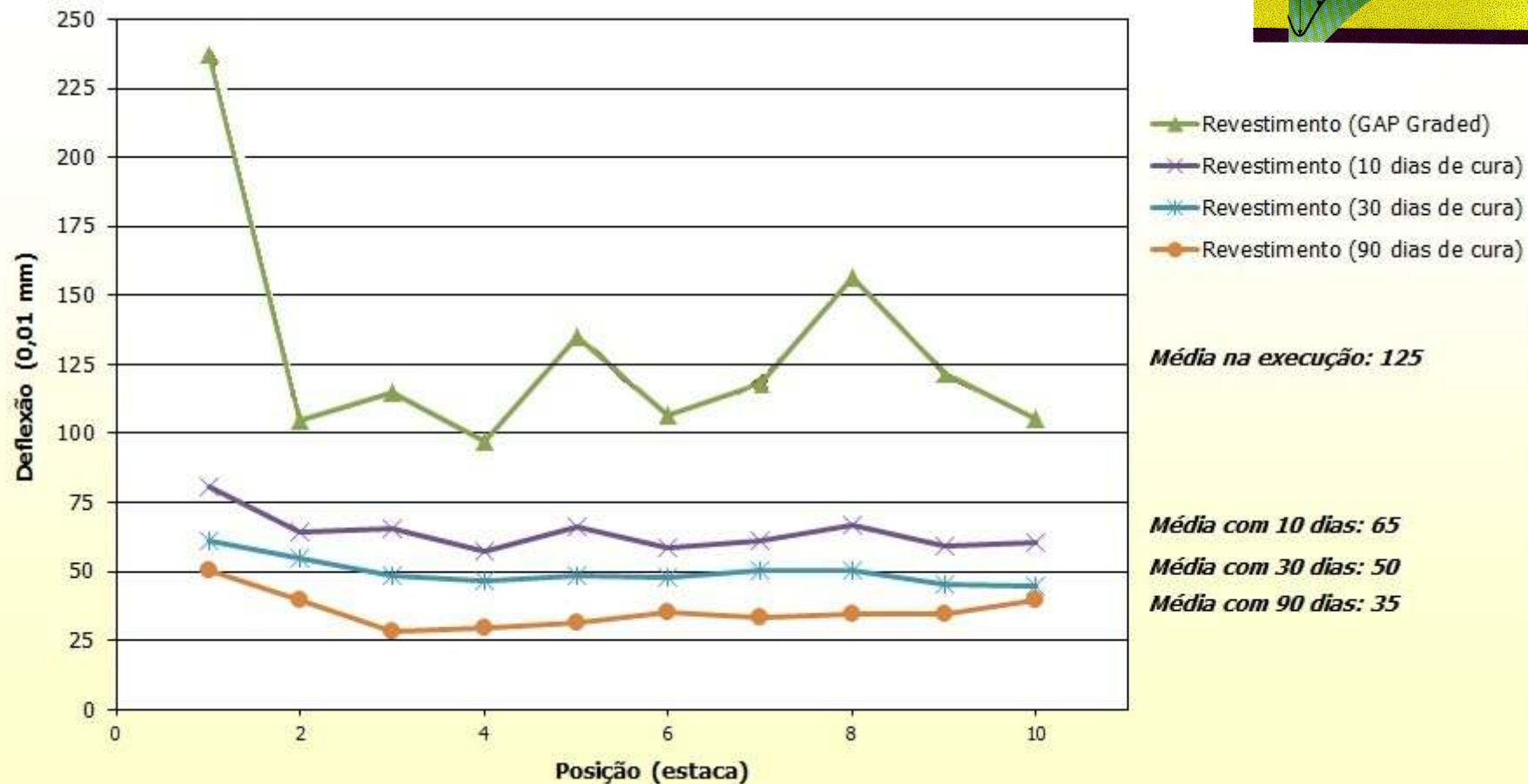
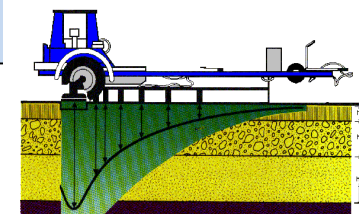
Fonte: Bomfim (2013)



*Aplicação da camada de rolamento
(Gap Graded) e compactação*

RECICLAGEM PROFUNDA – ESTUDO DE CASO

Levantamento Deflectométrico



Fonte: Bomfim (2013)



RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

RESÍDUO SÓLIDO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Resolução CONAMA nº 307 (2002)

Materiais provenientes de **construções, reformas, reparos e demolições** de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da **escavação** de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., que são comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Resíduo de Construção e Demolição (RCD) → *Construction and Demolition Waste (CDW)*

GERAÇÃO E DEPOSIÇÃO DE RCD

- Grande volume gerado em SP: ~ 17.000 t/dia
- Problema de deposição irregular
- Falta de espaço para deposição regular



RESOLUÇÃO CONAMA nº 307 (2002)

Classificação dos RCDs

Classe A: reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: cerâmicos, tijolos, blocos, telhas, argamassa, concreto, etc;

Classe B: recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;

Classe C: resíduos sem tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para reciclagem ou recuperação;

Classe D: resíduos perigosos, tais como: tintas, solventes, óleos, amianto, etc ou contaminados/prejudiciais à saúde.

Resolução CONAMA nº 307 (2002), com alterações (2004/2011/2012)

RECICLAGEM DE RCD

Coleta e Separação



Fonte: Ângulo et al. (2002)



RECICLAGEM DE RCD

Britagem e Peneiramento / Retirada da Ferragem



RECICLAGEM DE RCD

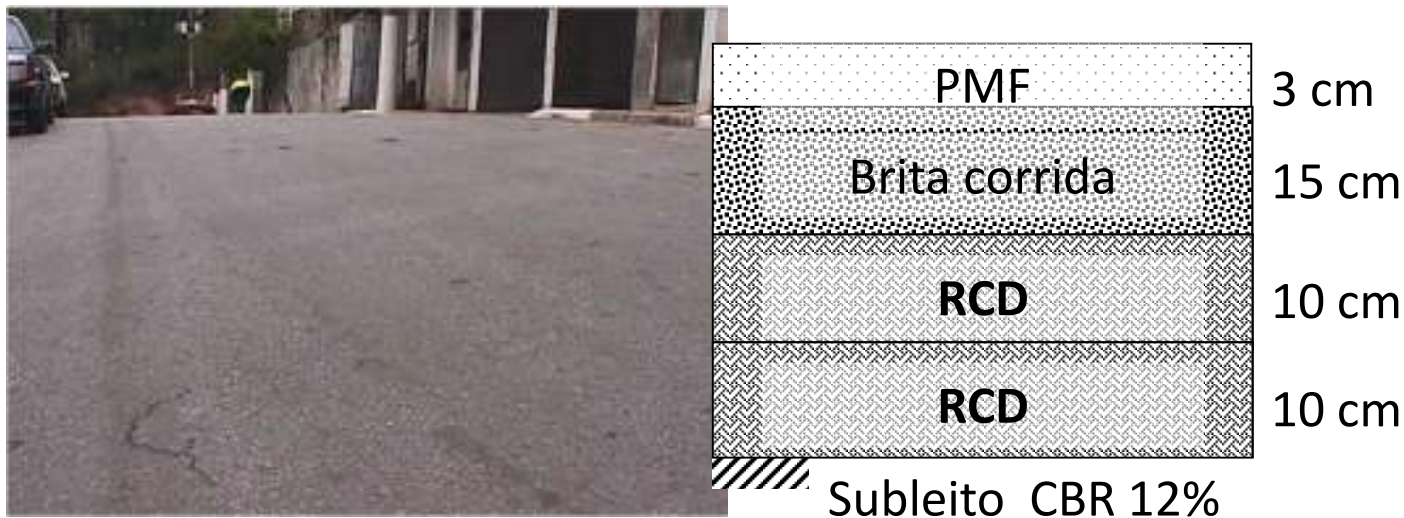
Produto Final



PAVIMENTAÇÃO COM RCD NO BRASIL

1984: *Primeira experiência no Brasil com acompanhamento tecnológico em SP (Parceria entre PMSP e IPT)*

- Via de baixo volume de tráfego
- Desempenho foi considerado bom



Bodi, J.; Brito Filho, J. A.; Almeida, S. Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, 1995. p.409-436.

PAVIMENTAÇÃO COM RCD NO BRASIL

1991: Primeira usina recicladora brasileira, em SP (PMSP)



NORMAS EM PAVIMENTAÇÃO

- **PMSP (2003)**
ETS - 001/2003 – Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil

- **ABNT (2004)**
NBR 15115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA URBANA
SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS VIÁRIOS
Especificação de Serviços
Camadas de Reforço do Subleito, Sub-base e Base Mista de
Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos de Construção Civil

PMSP/SP ETS - 001/2003 - CAMADAS DE REFORÇO DO SUBLEITO, SUB-BASE E
BASE MISTA DE PAVIMENTO COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.

INTRODUÇÃO

Esta especificação de serviços define as condições que orientam a execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com Agregado Reciclado de Resíduos Sólidos da Construção Civil, denominado "Agregado Reciclado", em obras de pavimentação sob a fiscalização da Prefeitura do Município de São Paulo.

1- OBJETIVO

Os serviços consistem no fornecimento de Agregado Reciclado para pavimentos, com características e restrições estabelecidas nos itens 1.1 e 1.2, além de carga, transporte, descarga, empilhamento e ocupação, assim como a mão-de-obra, materiais e equipamentos necessários à execução e ao controle de qualidade da camada de Agregado Reciclado, de conformidade com a especificação apresentada a seguir e detalhes executivos contidos no projeto.

- 1.1 resíduos sólidos da construção civil, comumente chamados de "resíduo de obra", adequados à execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista, são os provenientes de construções, reformas, reparos ou demolições de obras de construção civil, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, rebar, argamassas, telhas, pavimentos cerâmicos, etc., devendo ser evitada a presença de vidros, madeiras, metais, plásticos, gases, fiação, tubulações, fioses elétricos e papéis ou quaisquer materiais orgânicos ou não inertes;
- 1.2 Agregado Reciclado para pavimento é o material granular proveniente do beneficiamento, por meio de britagem e classificação, de resíduos de controle ou demolição de obra civil, conforme item 1.1, que apresenta características técnicas para aproveitamento em obras de pavimentação;
- 1.3 reciclagem é o processo de aproveitamento de resíduos, depois de terem sido submetidos à transformação;
- 1.4 reforço do subleito, sub-base e base mista de Agregado Reciclado para pavimento são camadas de material granular proveniente do beneficiamento através de britagem e classificação de resíduos sólidos da construção civil, conforme item 1.2, cujas técnicas executivas e controle de qualidade serão descritas a seguir;
- 1.5 para a presente especificação a base mista será sempre constituída por duas camadas, uma subjacente, necessariamente de Agregado Reciclado, e outra sobrejacente, de Macadame Betuminoso. Resíduo ou outro material que atenda as condições de custo e resistência do conjunto.

Publicado no DOM de 28/03/2003

225



MATERIAIS INDESEJÁVEIS

Gesso



Madeira

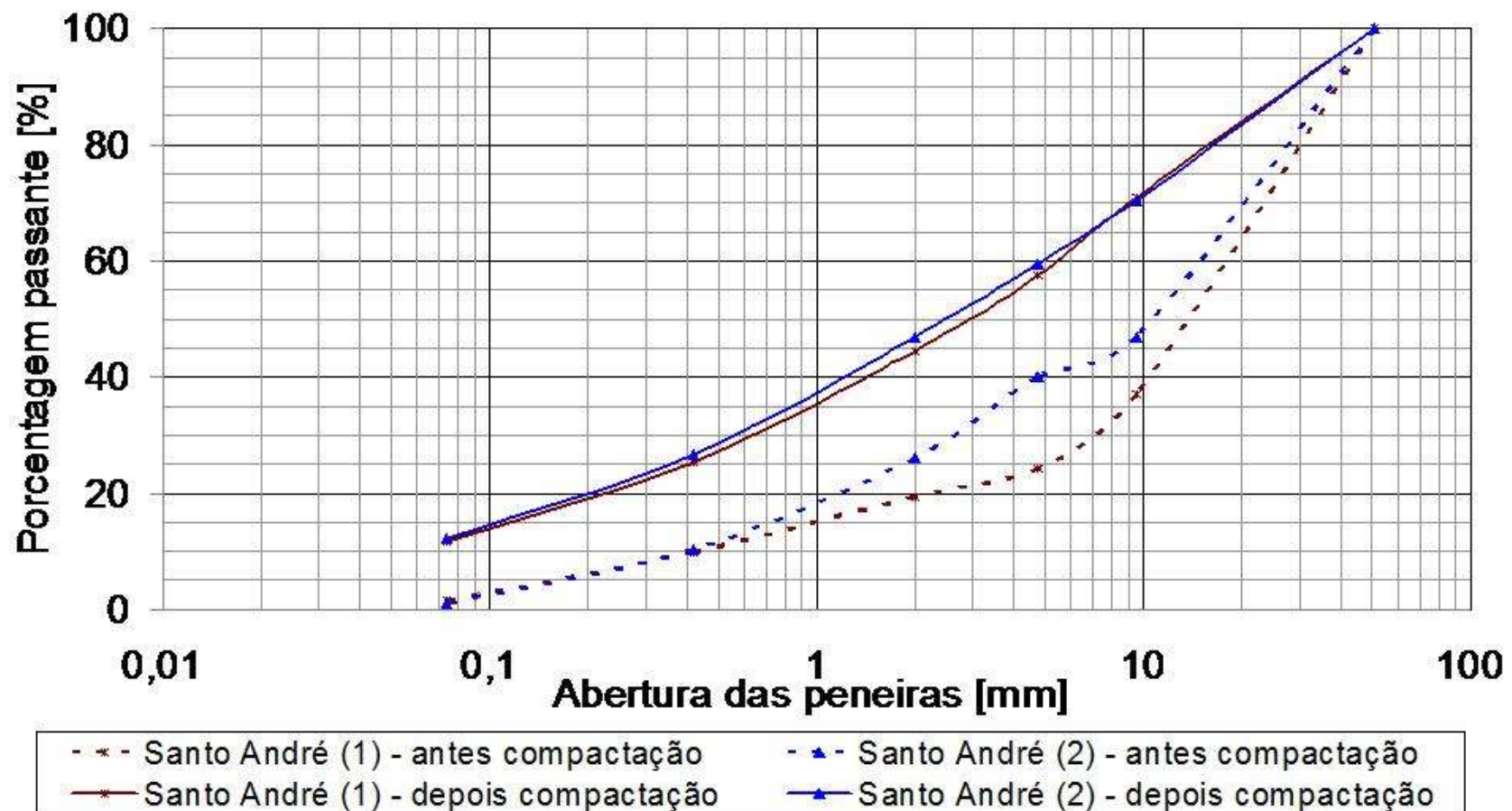


Plástico



CONTROLE TECNOLÓGICO DOS MATERIAIS

- Grande variabilidade granulométrica
- Após a compactação tornam-se mais similares



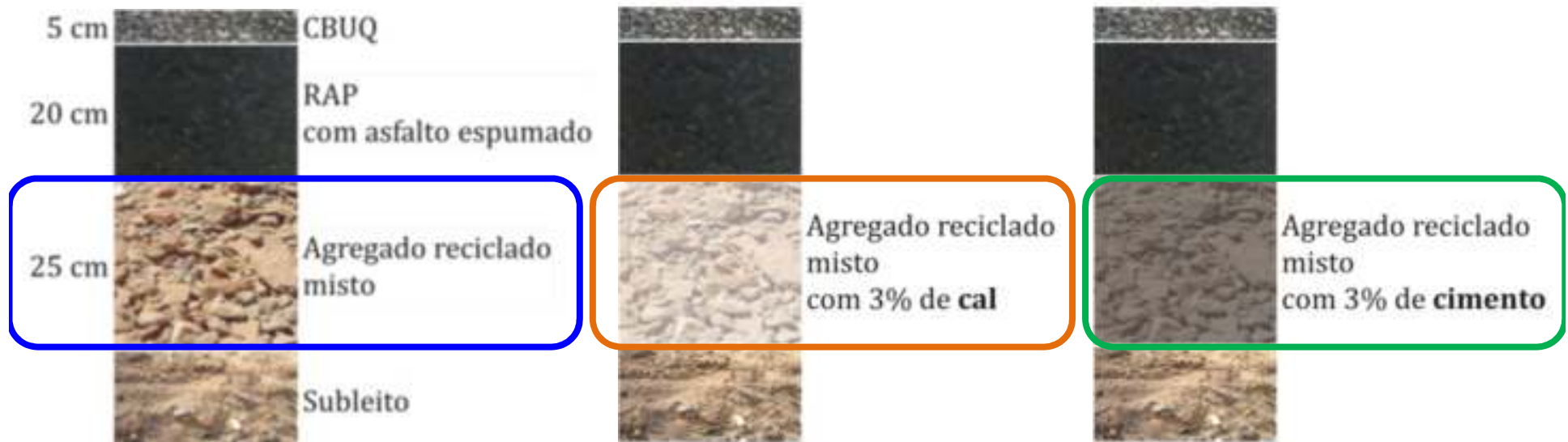
RCD – ESTUDO DE CASO (USP)

- Localizado na Av. Sapopemba – São Paulo, SP;
- Trecho total: 5000 m de extensão;
- Trecho experimental: 300 m de extensão - 100 m cada trecho;
- Pista simples

Trecho 1

Trecho 2

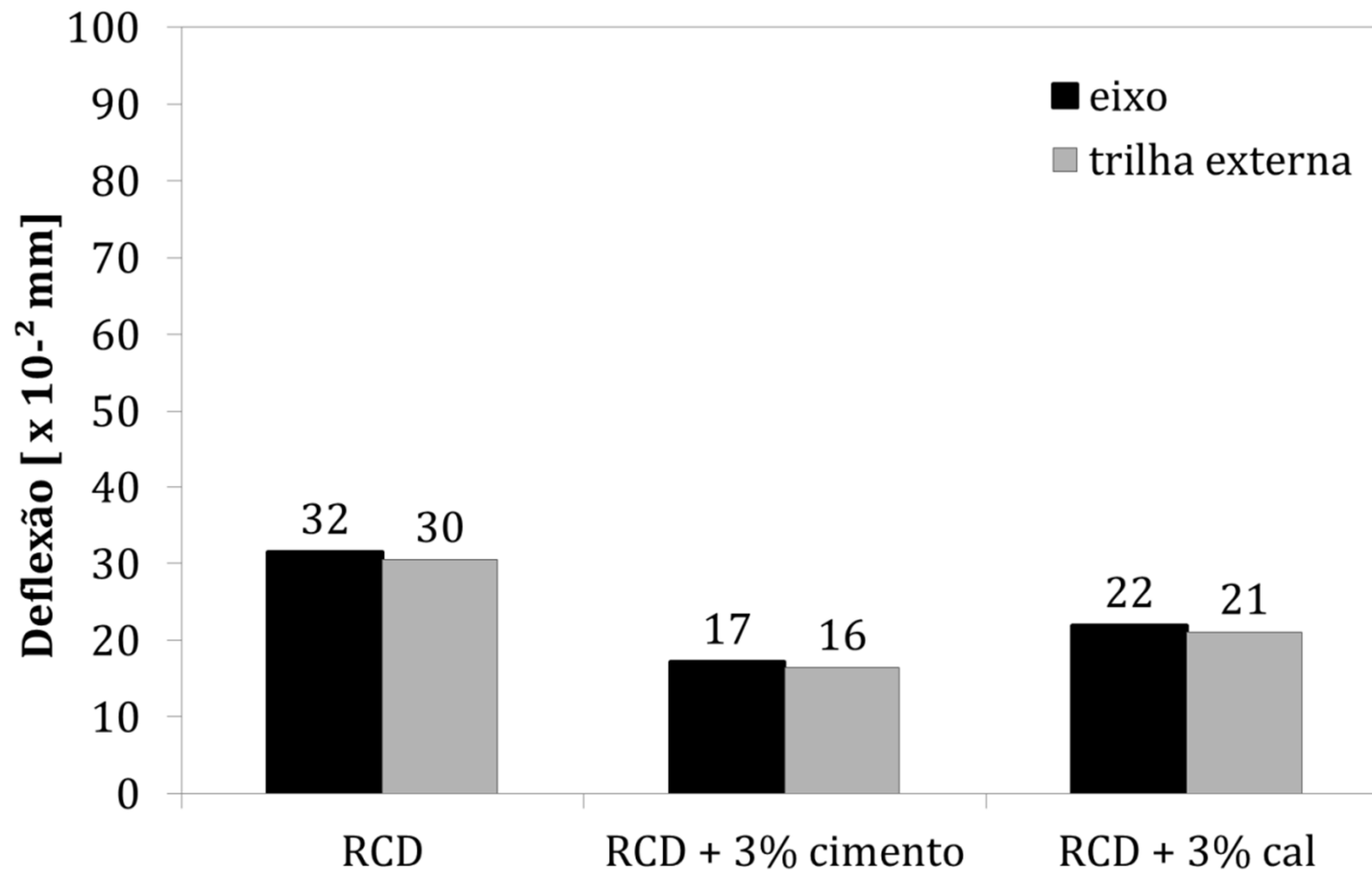
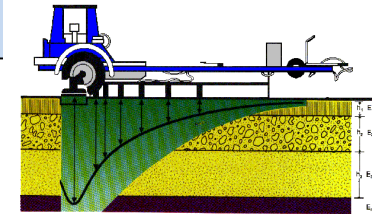
Trecho 3



Fonte: Beja (2014)

RCD – ESTUDO DE CASO (USP)

Levantamento Deflectométrico



RECICLAGEM DE RCD

Custo

TABELA DE PREÇOS DE PAVIMENTAÇÃO DA PMSP (Jul/2011)

Obra	Preço (R\$)
Base de macadame hidráulico	153,49
Base de BGTC	131,83
Base de bica corrida	104,61
Base de BGS	96,04
Base de agregado reciclado de RCD	70,68



ESCOLA
POLITÉCNICA
DA USP



Profa. Kamilla Vasconcelos

kamilla.vasconcelos@usp.br