

RECICLAGEM DE PAVIMENTOS: PESQUISAS E AVANÇOS DO GRUPO DA POLI-USP



Kamilla Vasconcelos

03 de maio de 2022

The slide features two decorative vertical bars on the left and right sides. Each bar is composed of three stacked rectangular segments: a light green segment at the top, a dark grey segment in the middle, and a dark teal segment at the bottom. The central text is in a bold, dark grey, sans-serif font.

AGRADECIMENTOS

Trabalhos de **reciclagem** do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (POLI-USP)

2000...



✓ **SUSTENTABILIDADE**

✓ **MATERIAL FRESADO (RAP)**

✓ **DOSAGEM**

✓ **COMPORTAMENTO MECÂNICO**

✓ **ASPECTOS CONSTRUTIVOS**

✓ **DESAFIOS**

✓ **DESEMPENHO AMBIENTAL**

✓ **REFLEXÕES FINAIS**



**RECICLAGEM A
QUENTE/MORNA**



RECICLAGEM A FRIO

SUSTENTABILIDADE





DADOS DO MERCADO NORTE AMERICANO PARA O ANO DE 2019:

- ✓ U\$3,2Bi de economia devido ao uso de RAP em misturas asfálticas
- ✓ Redução de 2,4 milhões de toneladas de CO₂

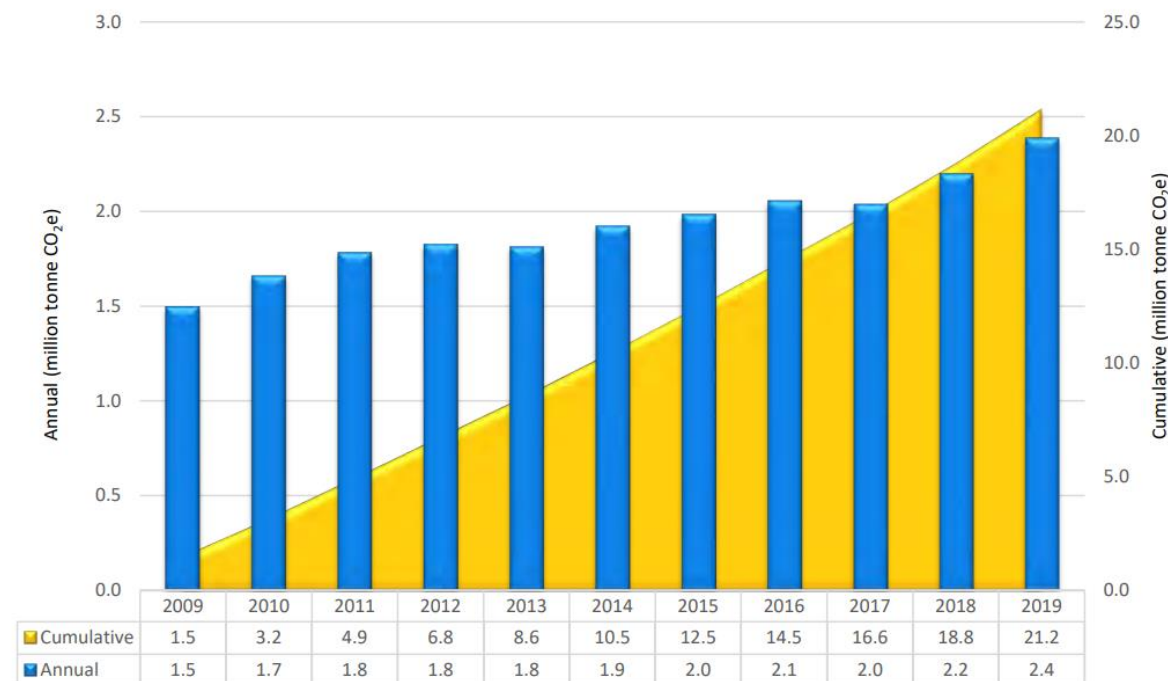


Figure 19: GHG Emissions Reduction from Use of RAP in New Asphalt Mixtures, 2009–2019

Fonte: NAPA, 2019

Table 13: Material Savings, 2018–2019

Material	Material Quantity, Million Tons		% Agg.	% AC	Aggregate Cost Savings, \$ Billion		Asphalt Binder Cost Savings, \$ Billion		Total Cost Savings, \$ Billion	
	2018	2019			2018	2019	2018	2019	2018	2019
RAP	82.2	89.2	95	5	\$0.822	\$0.916	\$1.981	\$2.375	\$2.803	\$3.291



A IMPORTÂNCIA DA GESTÃO DO MATERIAL FRESADO



Silva (2017)

FRESAGEM



ESTOCAGEM



BENEFICIAMENTO

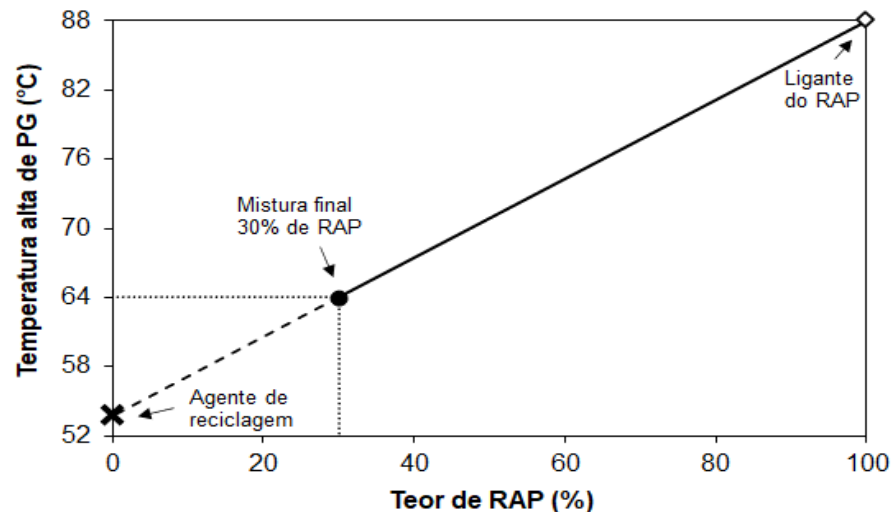


Suzuki (2019)



DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

RECICLAGEM A QUENTE - PREMISSAS DA DOSAGEM



Asphalt Institute, 2017

BLENDING CHARTS

“Ligantes do RAP e virgem formam uma camada perfeitamente **homogênea** (...)”

VISCOSIDADE

PENETRAÇÃO & PONTO DE AMOLECIMENTO

PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS LINEARES



Asphalt Institute, 1995



EN 13108-8, 2005



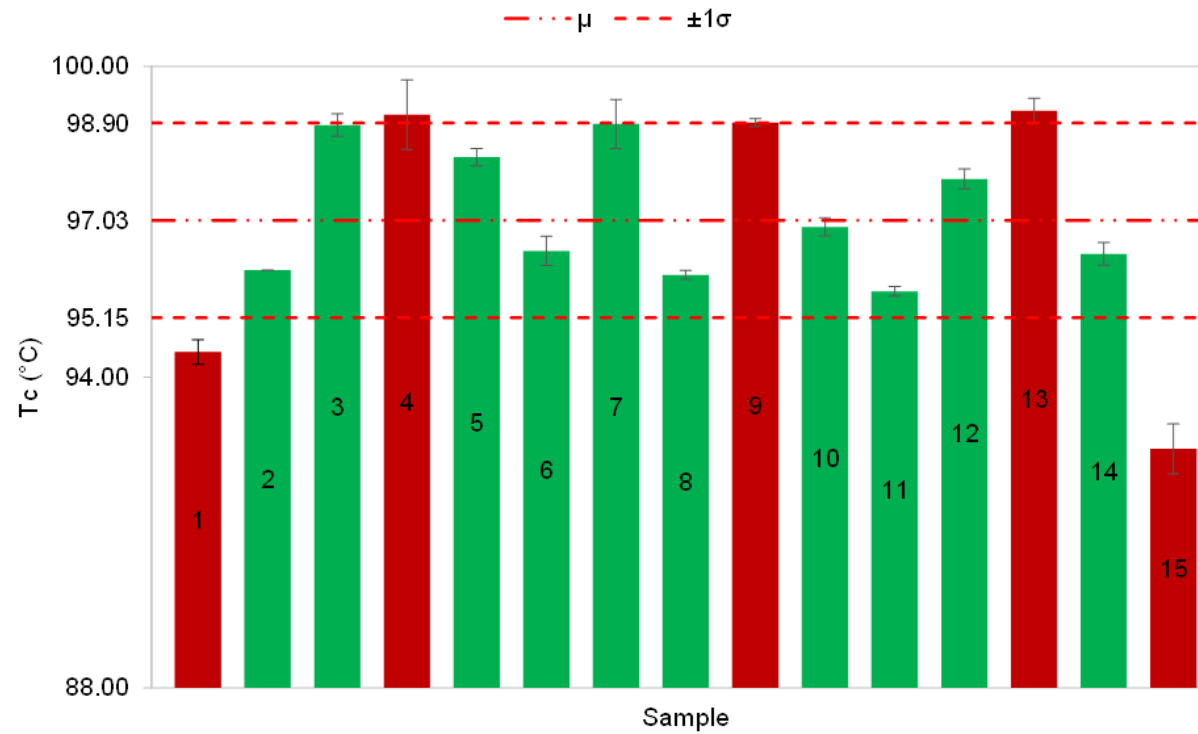
AASHTO M 323, 2017



AUSTROADS AGTP/T193, 2015



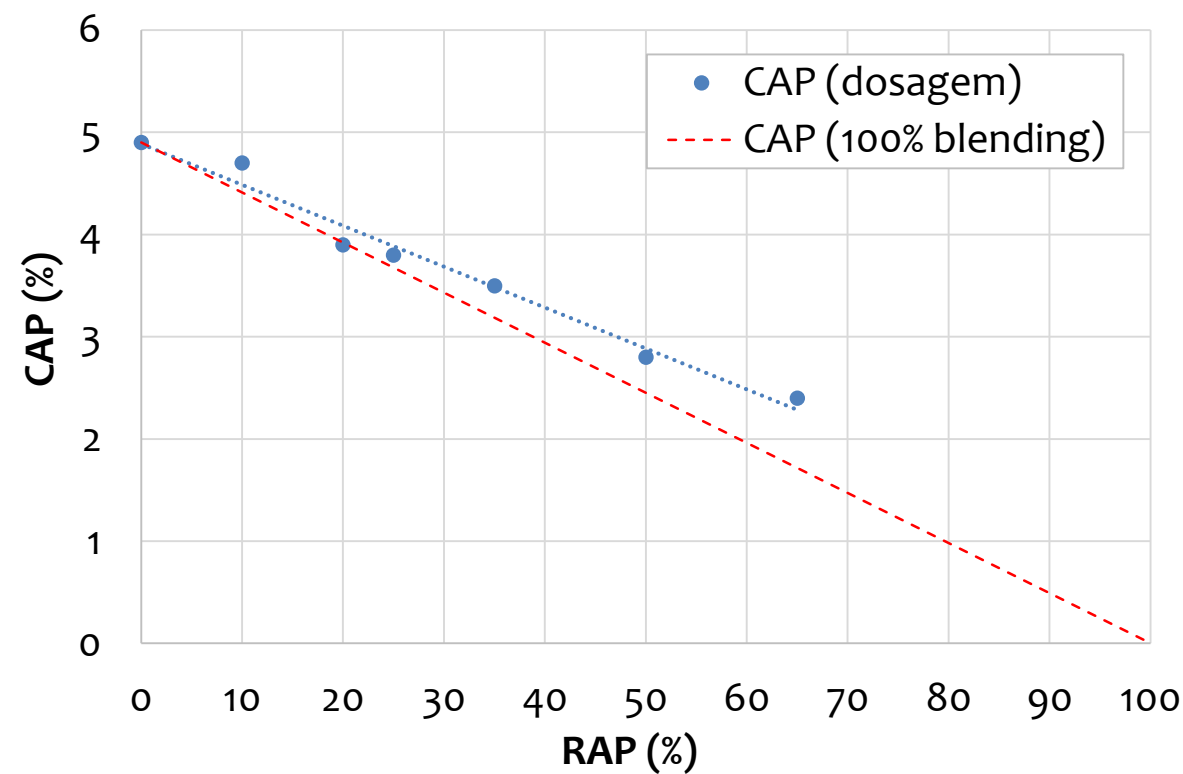
VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO LIGANTE RECUPERADO DE UM MESMO RAP



DIFERENTES TEORES DE RAP

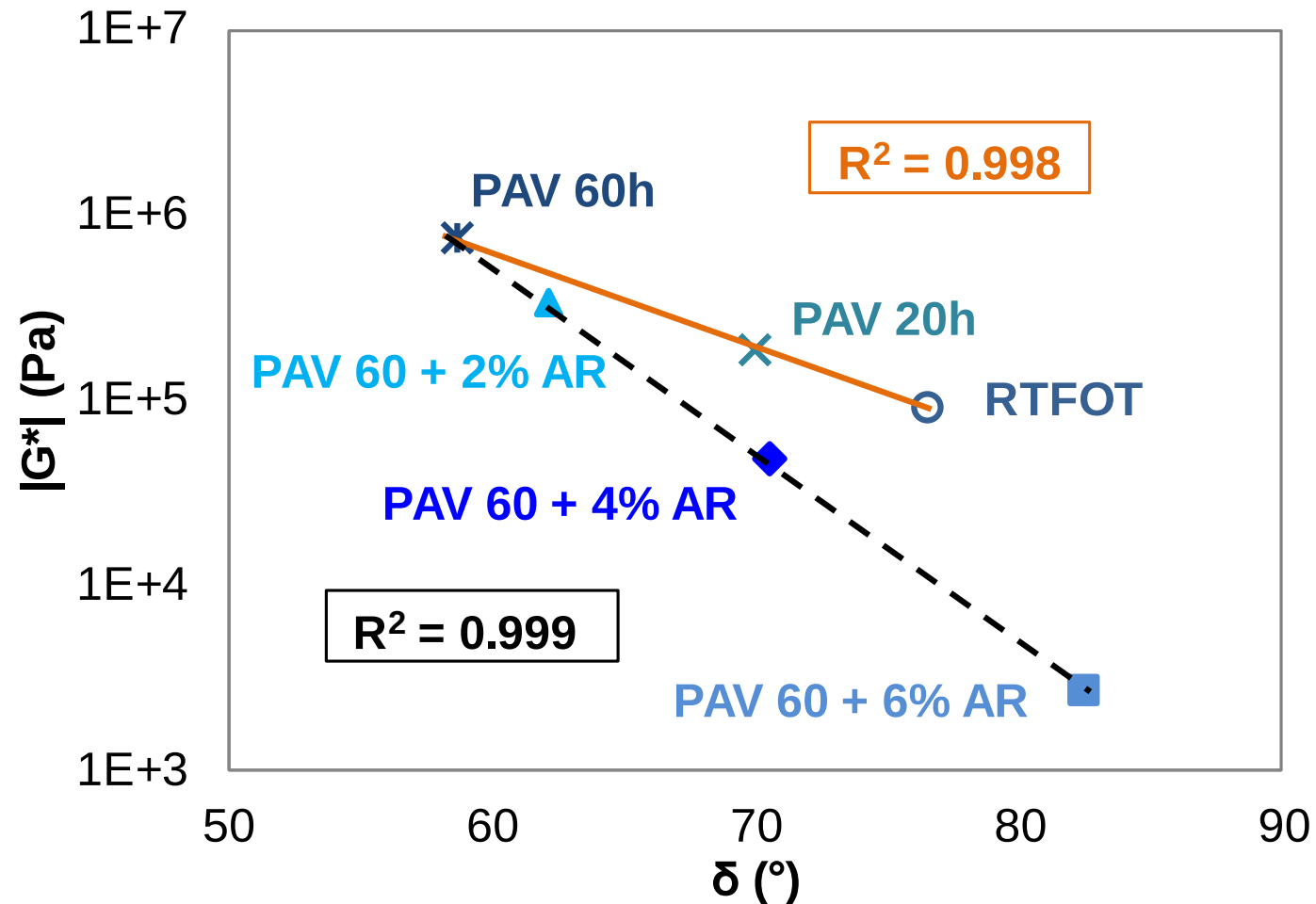


Mistura	Teor de projeto de CAP virgem (%)	Gmb (g/cm³)	Gmm (g/cm³)	V _v (%)	VAM (%)	RBV (%)
Mo	4,9	2,57	2,68	4,2	16,36	74,35
M10	4,7	2,53	2,64	4,4	15,85	72,35
M20	3,9	2,53	2,64	4,2	14,02	70,20
M25	3,8	2,53	2,64	4,2	13,62	68,91
M35	3,5	2,53	2,64	4,4	12,91	65,74
M50	2,8	2,50	2,62	4,3	12,27	65,37
M65	2,4	2,51	2,63	4,4	11,00	59,60





Parâmetro GR (PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS LINEARES)





Importante verificar a
durabilidade da mistura
reciclada e não somente a
volumetria.



MÉTODO DE COMPACTAÇÃO DE CRAMs



GIRATÓRIO



SEM PROBLEMAS DE
EXSUDAÇÃO

CONTROLE SATISFATÓRIO DA
ENERGIA DE COMPACTAÇÃO

MENOR VARIAÇÃO DO TEOR
DE VAZIOS (CPs)

2ª OPÇÃO: VIBRATÓRIO

PROCTOR -> RISCO DE
QUEBRA DOS AGREGADOS

85% RAP + 15% PÓ DE PEDRA
(4,0% EMULSÃO)



COMPACTAÇÃO: GIRATÓRIO +
LOCKING POINT

CURA: 7 DIAS SELADO (TEMP.
AMBIENTE) + 7 DIAS LIVRE (40°C)



A dosagem no geral é feita levando-se em consideração a **resistência e o dano por umidade.**

The title is centered on a light gray background. On the left and right sides of the text, there are vertical decorative bars. Each bar consists of three segments: a thin light green segment on the outer edge, a thin gray segment in the middle, and a wider dark teal segment on the inner edge closest to the text.

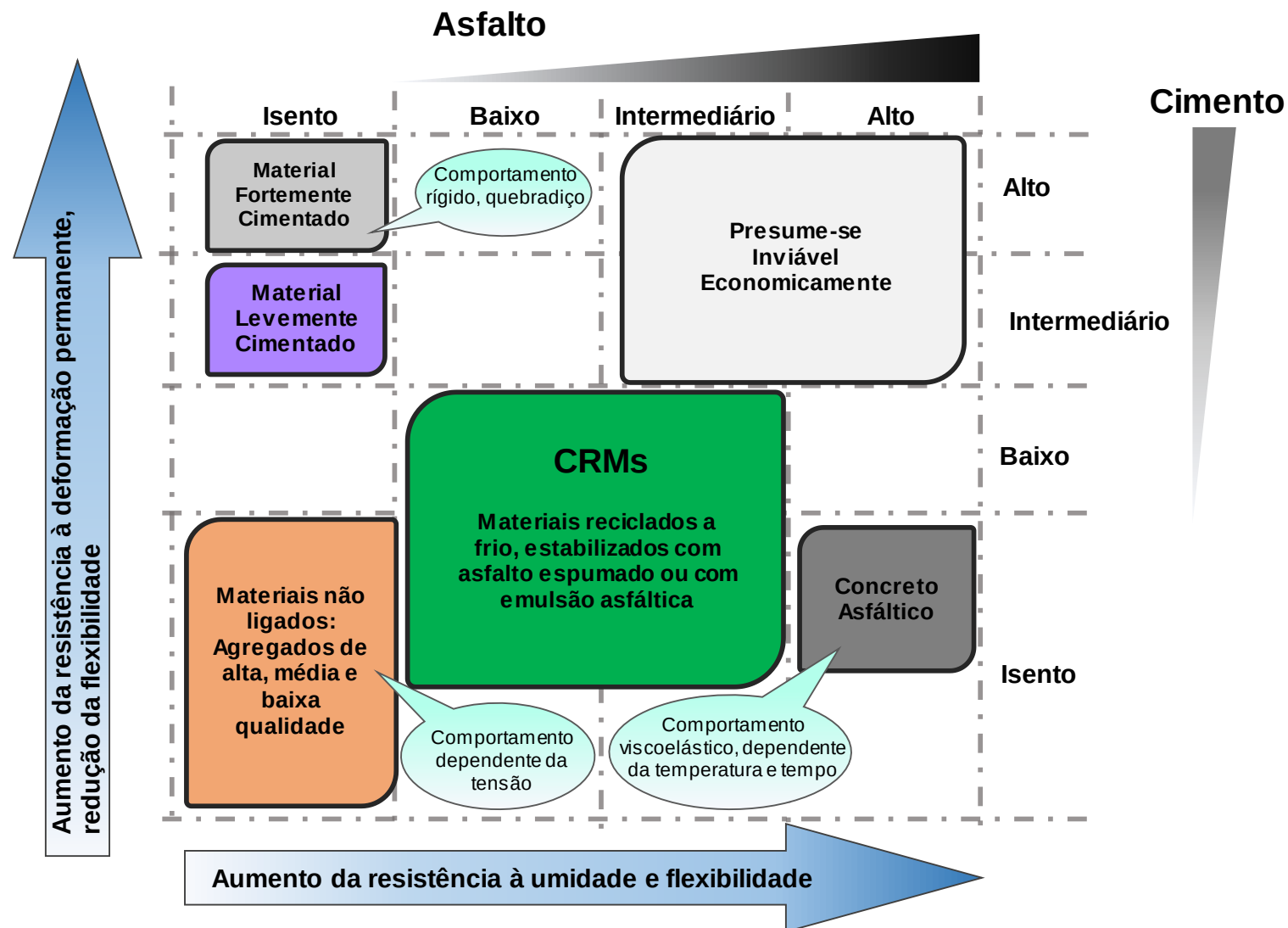
COMPORTAMENTO MECÂNICO E PROJETO ESTRUTURAL



Ativação do ligante
asfáltico do RAP

Rejuvenescimento →
aumento da **durabilidade**

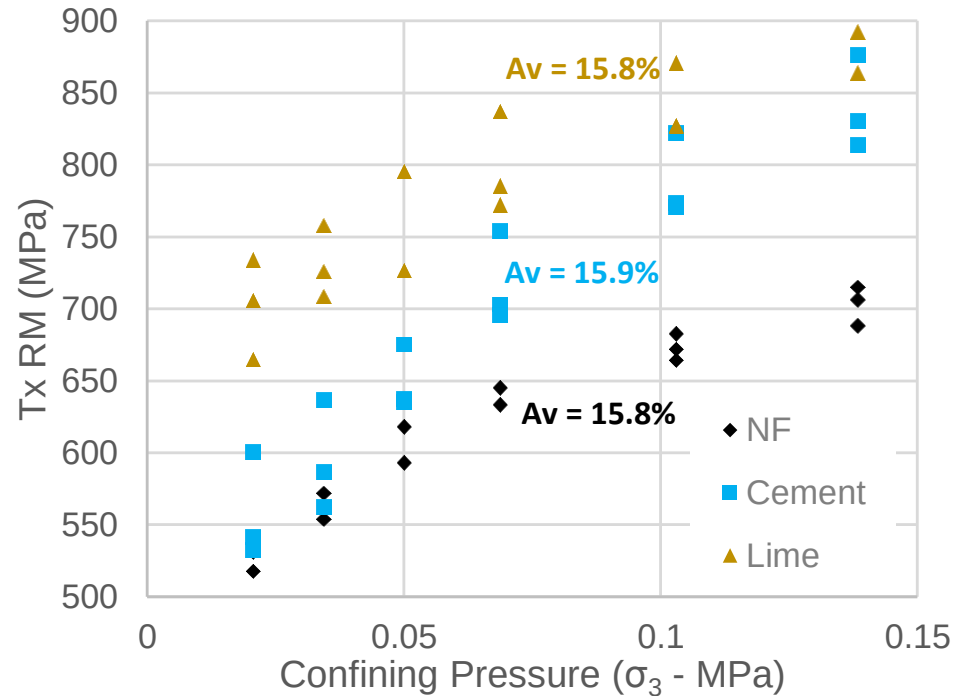
COMPOSIÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA RECICLADA A FRIO



Adaptado de Asphalt Academy, 2009

RIGIDEZ (TRIAXIAL)

Comportamento dependente do estado de tensão

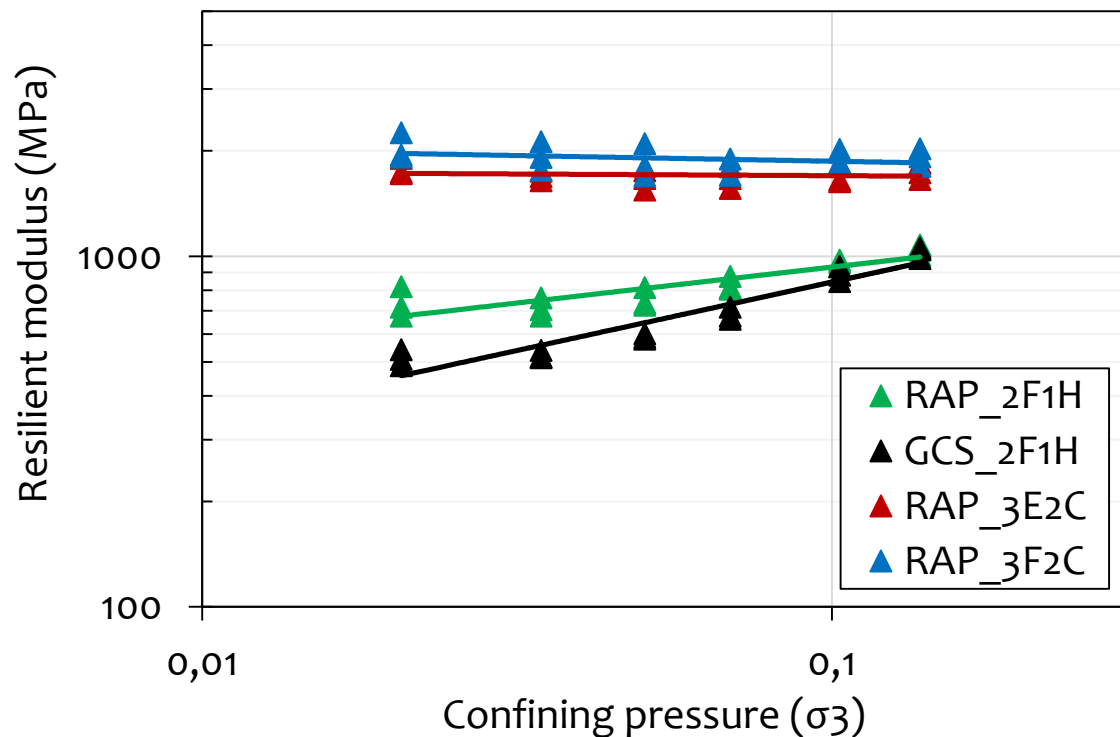


Mixture	k_1	k_2	k_3
NF	1024.95 ± 51,63	0.276 ± 0,029	- 0.124 ± 0,023
Cement	1402.70 ± 89,40	0.302 ± 0,038	- 0.070 ± 0,031
Lime	1200.11 ± 52,48	0.226 ± 0,025	- 0.102 ± 0,021

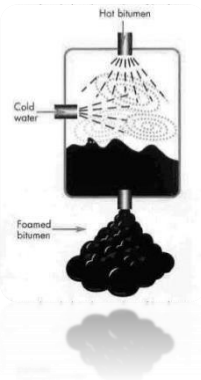
MISTURAS COM ADIÇÃO DE CAL APRESENTARAM MAIORES VALORES DE RIGIDEZ E MENOR DEPENDÊNCIA DA TENSÃO CONFINANTE

Pezo (1993) $TxRM = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$

RIGIDEZ (TRIAXIAL)

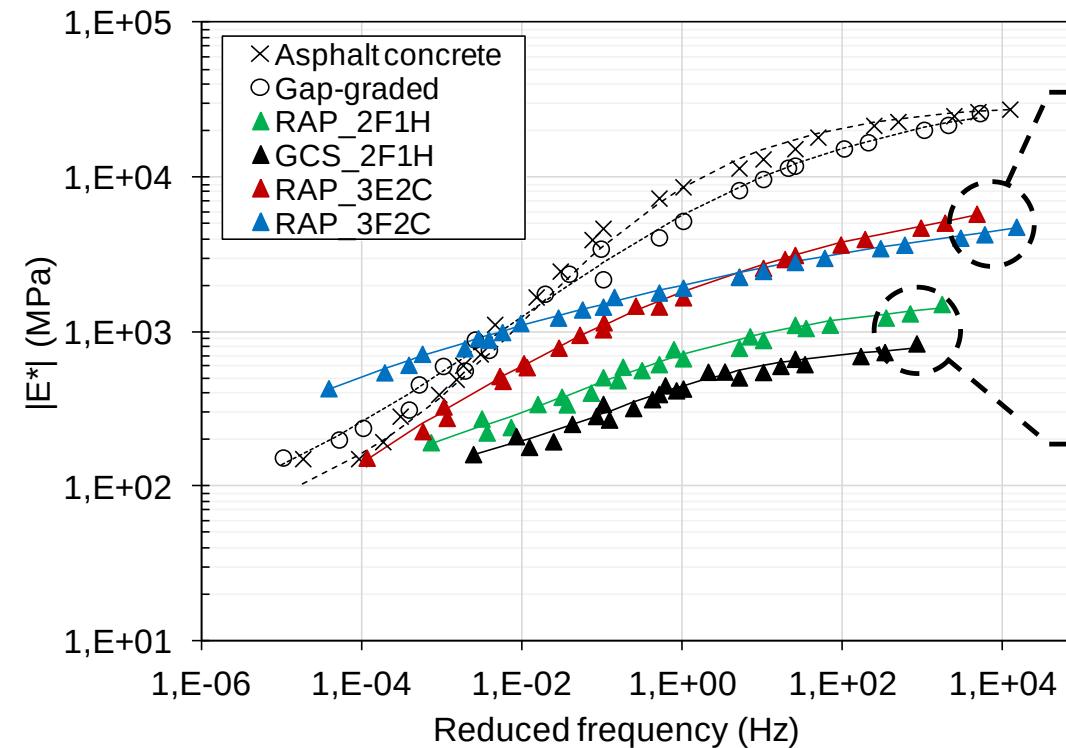
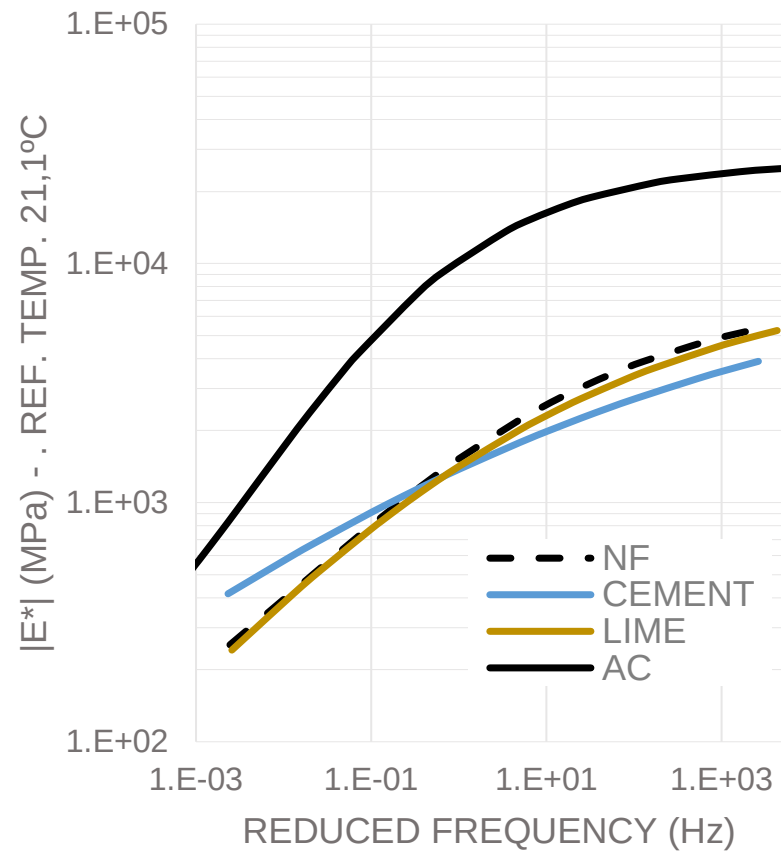


- Aumento de rigidez devido a hidratação do cimento.
- As misturas com **cal hidratada** avaliadas mostraram **dependência** do estado de tensão.
- As misturas com **cimento Portland** avaliadas mostraram **independência** do estado de tensão.
- **RAP_3E2C** e **RAP_3F2C** são estruturalmente similares.



RIGIDEZ (MÓDULO DINÂMICO)

Comportamento dependente da temperatura e frequência



- Diferença na forma de dispersão do ligante asfáltico
- Cimentada & Viscoelástica
- Dependência do estado de tensão
- Granular & Viscoelástica

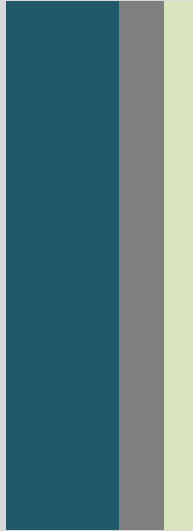


Desempenho no **curto** e
longo prazo

Projeto estrutural de
pavimentos compatível com os
materiais



ASPECTOS CONSTRUTIVOS



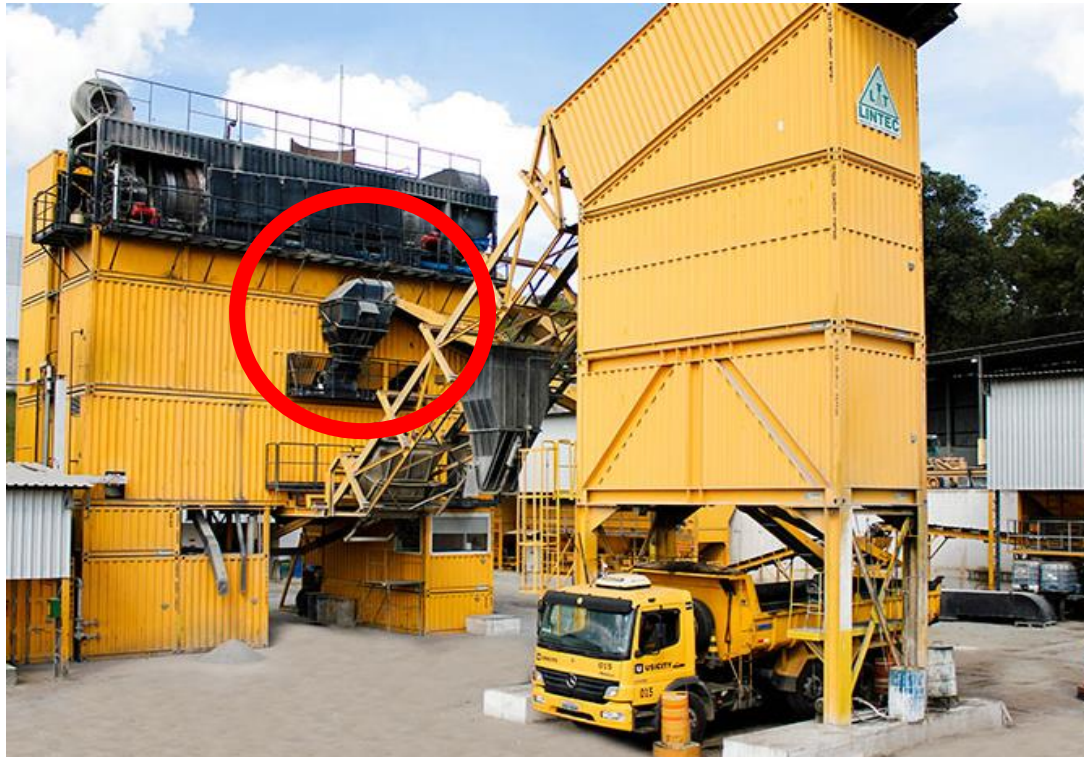
PRODUÇÃO EM USINA GRAVIMÉTRICA



35%

Adição de AR
na linha de ligante

Entrada do RAP no misturador



Correia transportadora
de material reciclado

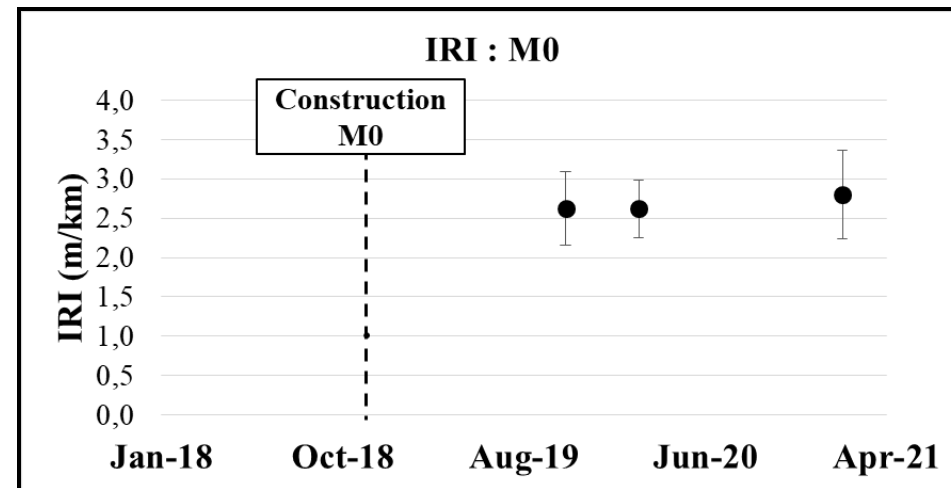
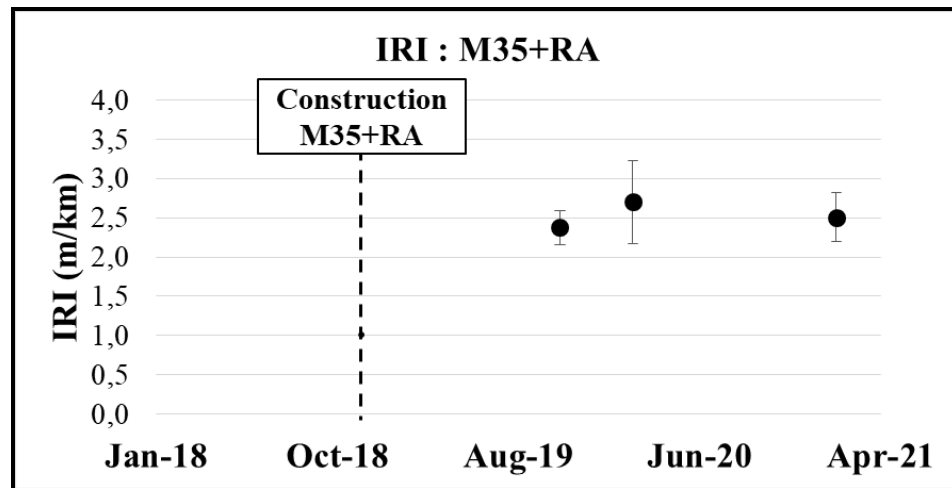
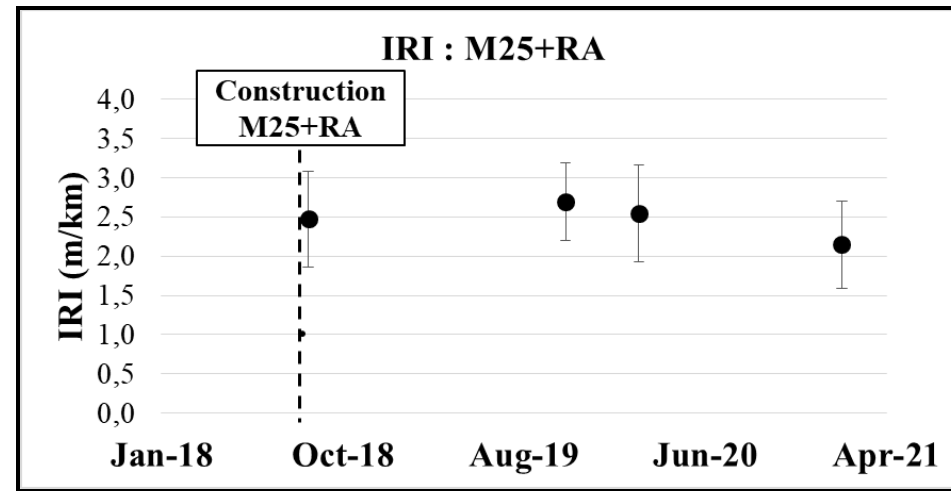
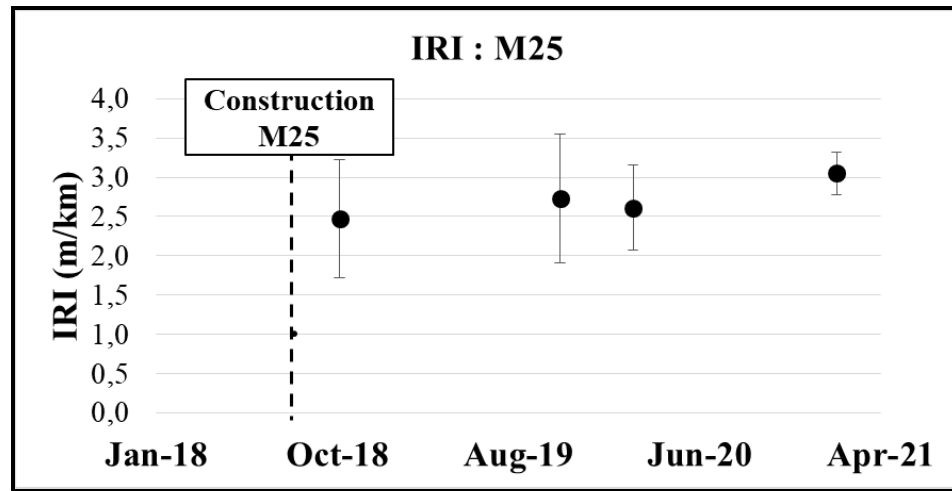


Fonte: Empresascity



Trecho Experimental	Código da Mistura	Data da obra	Km inicial	Km final	Extensão (m)	Teor RAP (%)	Agente de Reciclagem
1	M25	18/08/2018	25+000	25+300	300	25	Não
2a	M25+RA	22/08/2018	27+700	27+820	120	25	Sim
2b	M25+RA	06/10/2018	27+820	28+000	180	25	Sim
3	M35+RA	08/12/2018	26+235	26+297	62	35	Sim
Controle	M0	08/12/2018	26+297	26+363	66	0	Não

DADOS DE MONITORAÇÃO – Irregularidade Longitudinal (IRI)





Adaptação de **usinas**

Gestão do RAP

Ativação do **ligante**
do RAP

PREPARO DA MISTURA

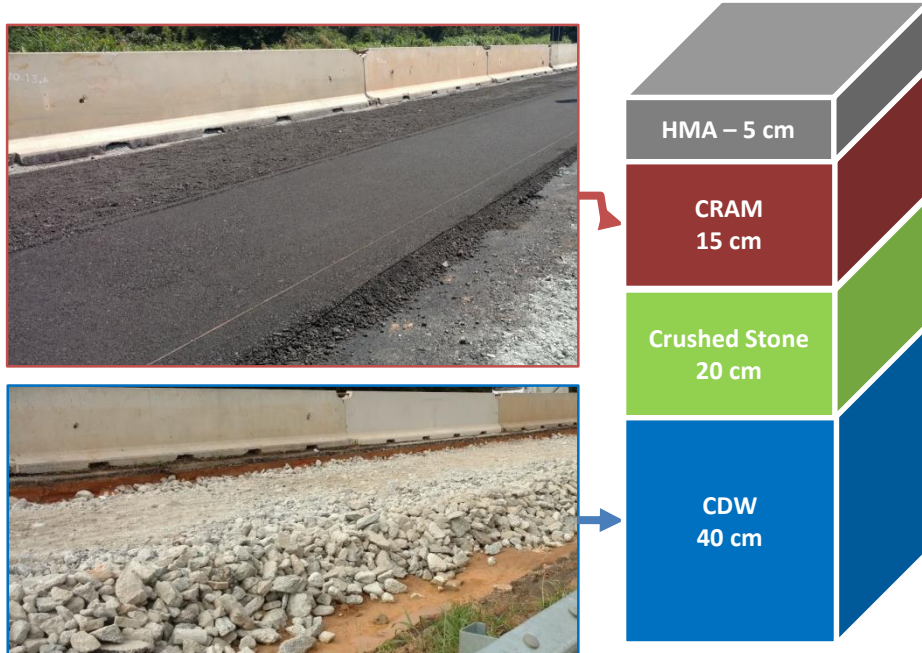


IN SITU

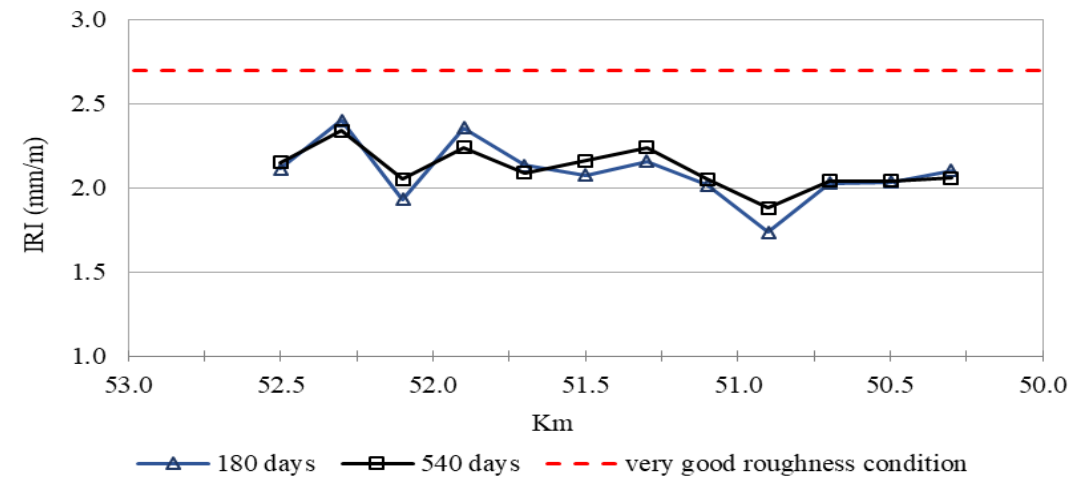
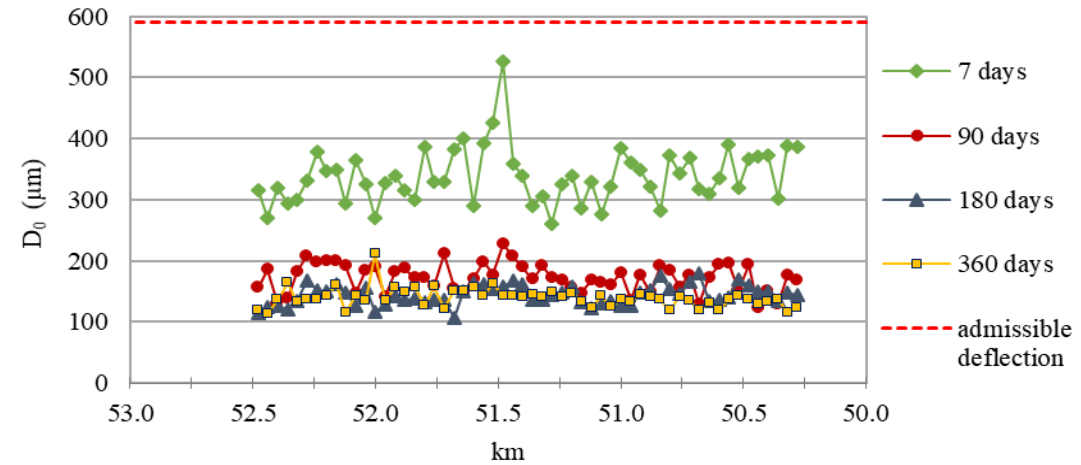


EM USINA

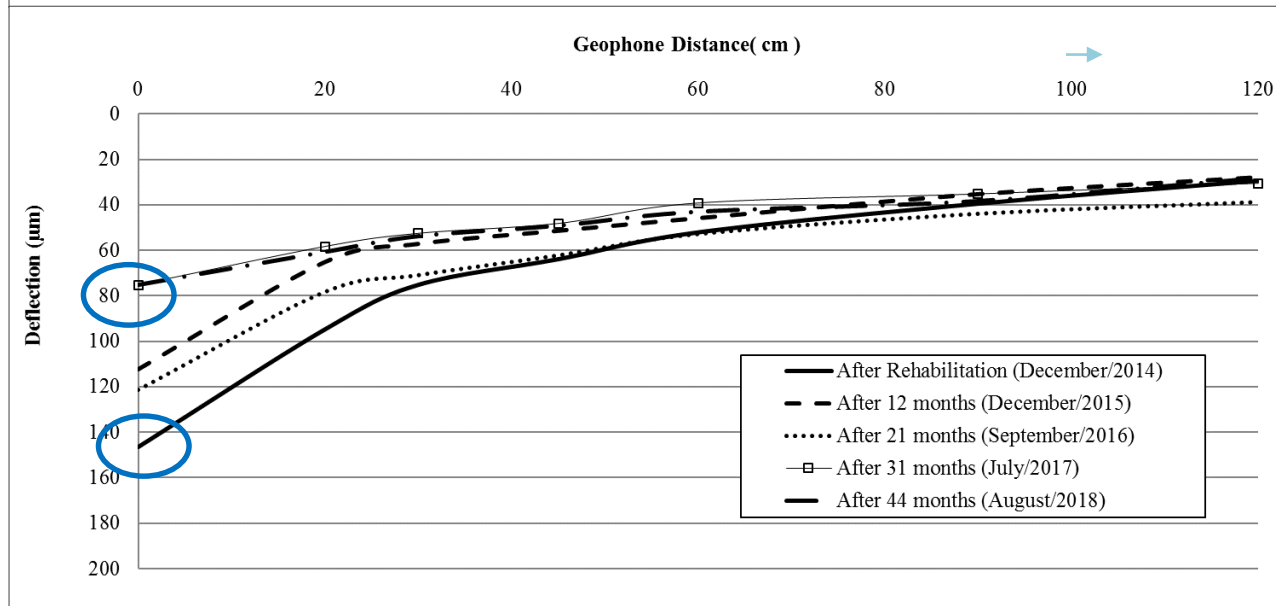
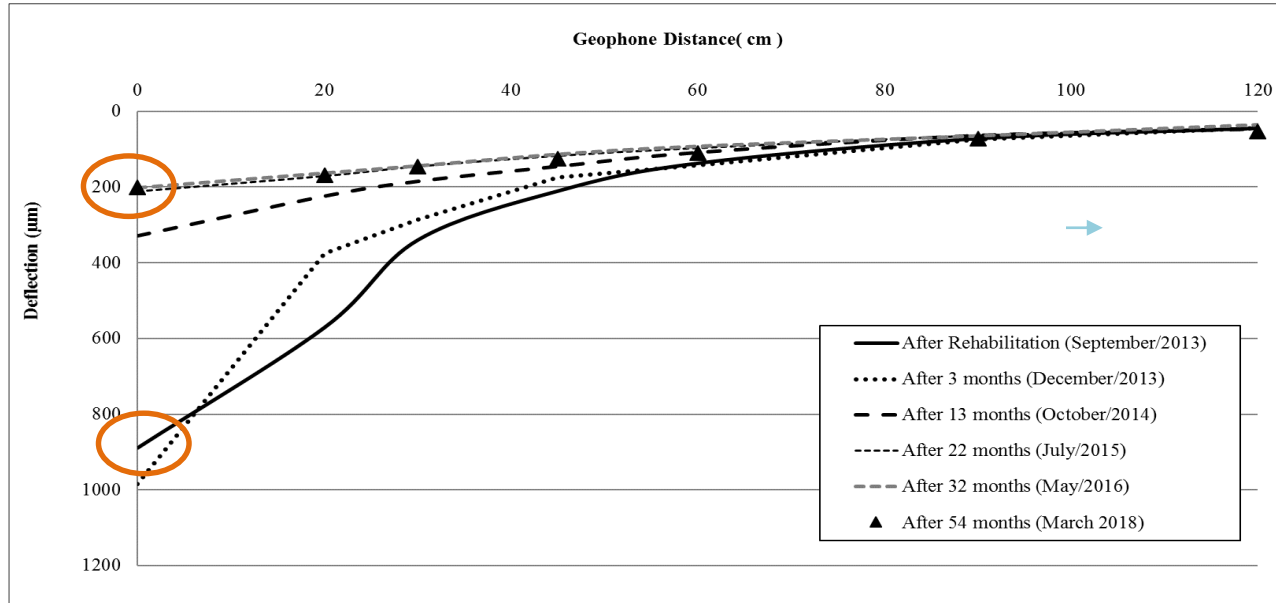
TRECHOS EXPERIMENTAIS – SP280



Test section construction and monitoring



EFEITO DA ESTRUTURA, COMPOSIÇÃO E CURA DA MISTURA



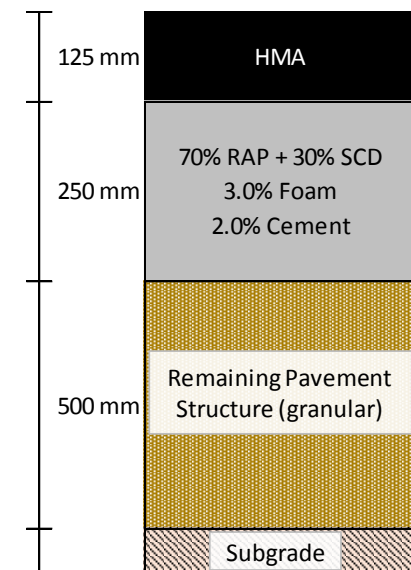
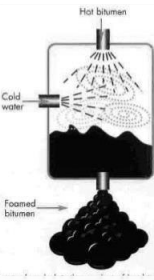
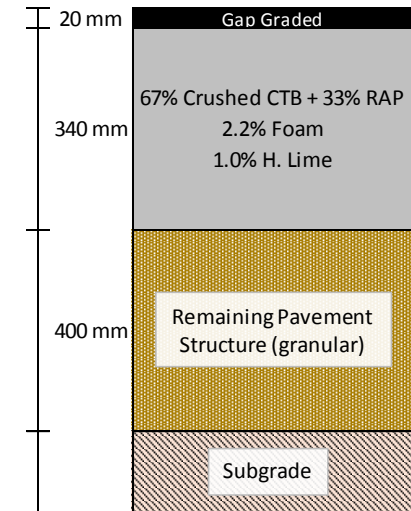
Guatimosim et al. (2019)

Trecho 1

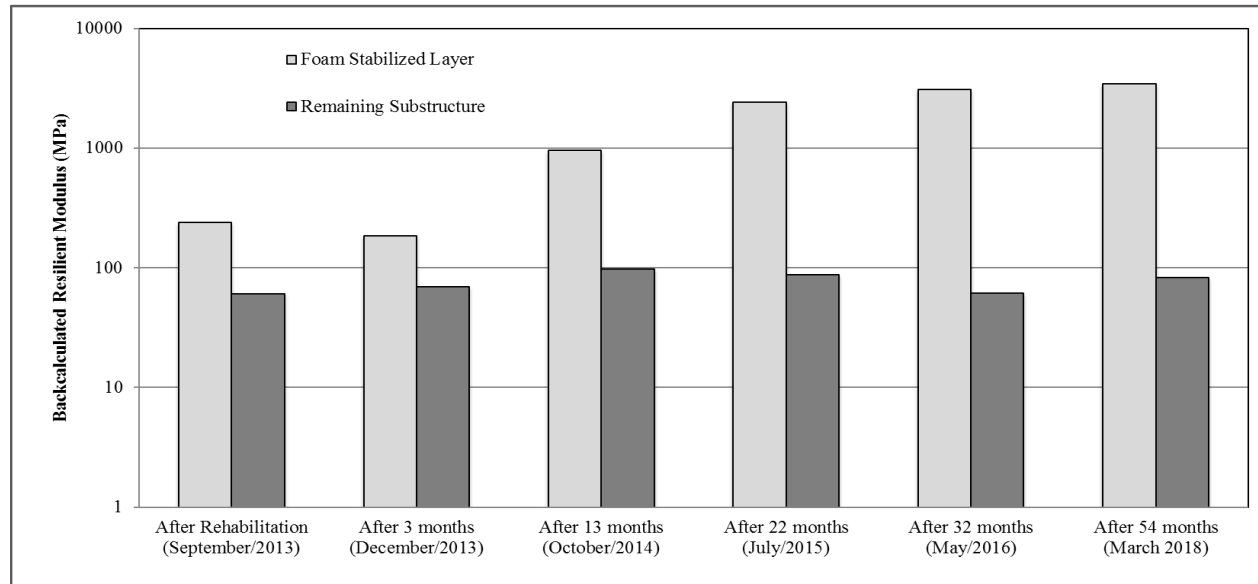
CTB+RAP_2.2F1H

Trecho 2

RAP_3F2C



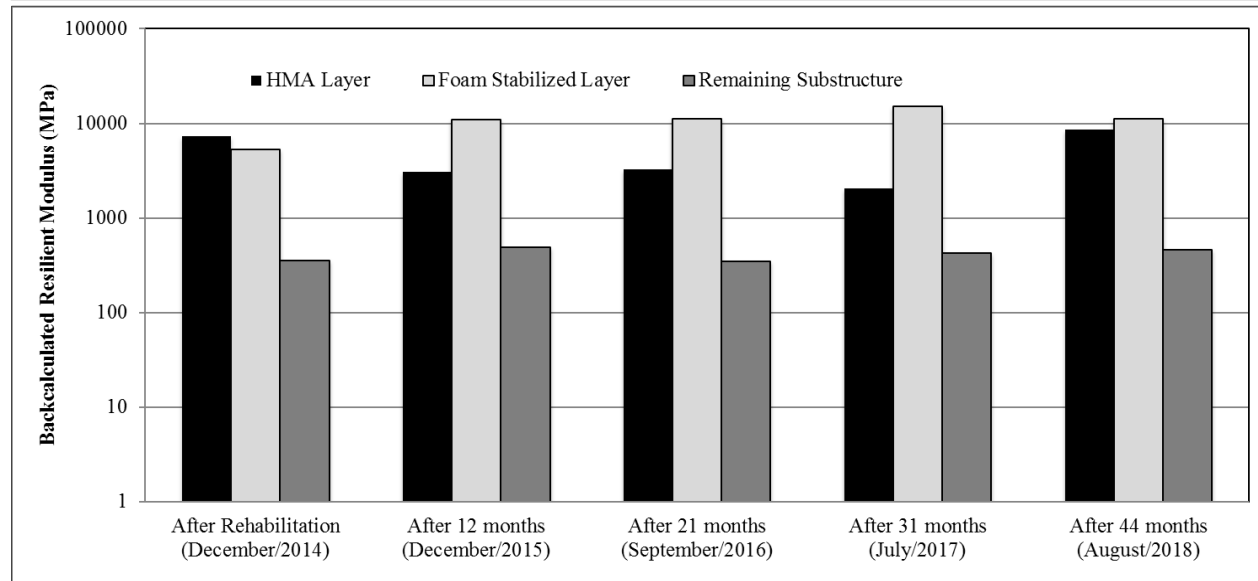
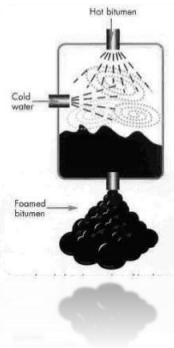
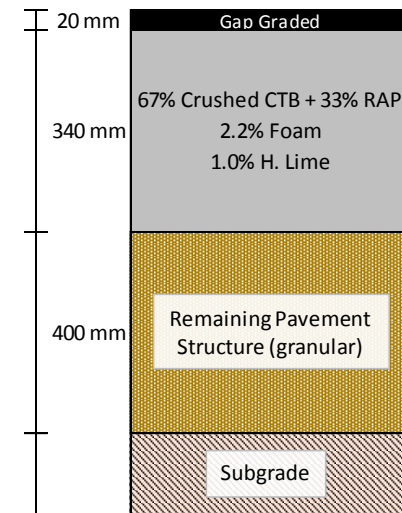
EFEITO DA ESTRUTURA, COMPOSIÇÃO E CURA DA MISTURA



Guatimosim et al. (2019)

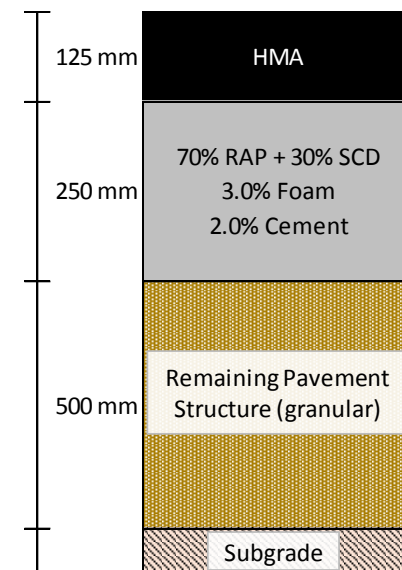
Trecho 1

RAP + Base cimentada
2.2% foamed asphalt
1% hydrated lime



Trecho 2

RAP + Pó de Pedra
3% foamed asphalt
2% Portland cement



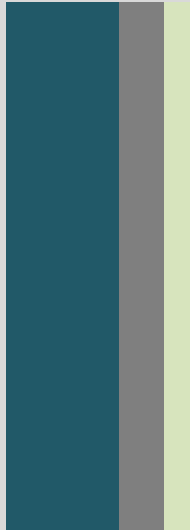


Controle tecnológico e Cura

Equipamentos e Equipe



DESAFIOS

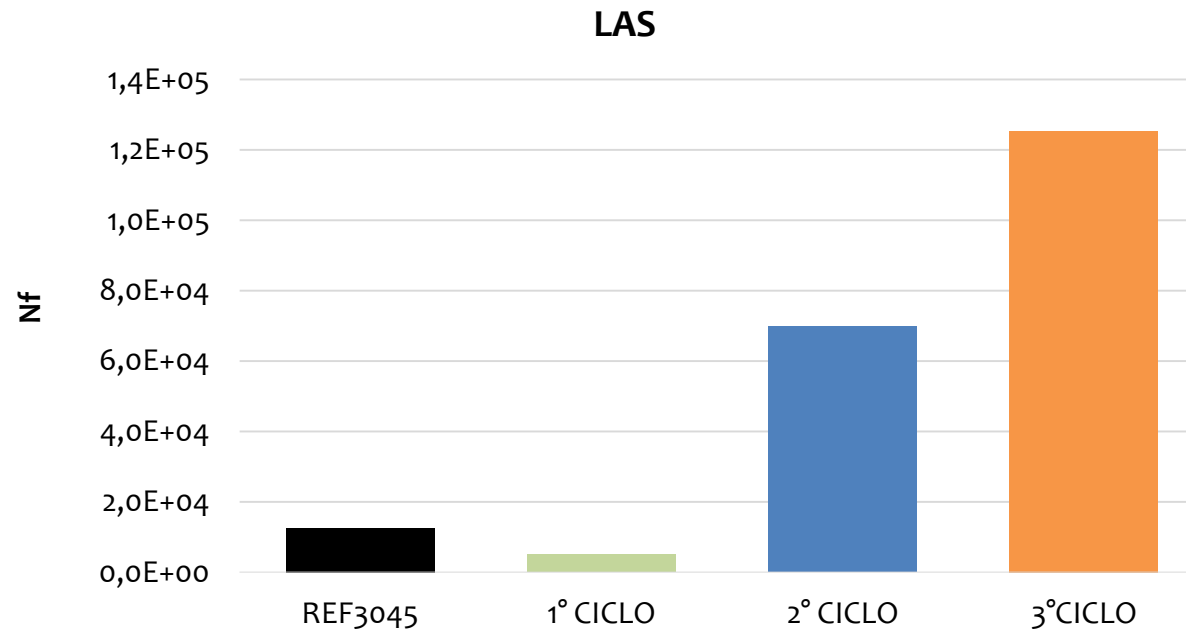
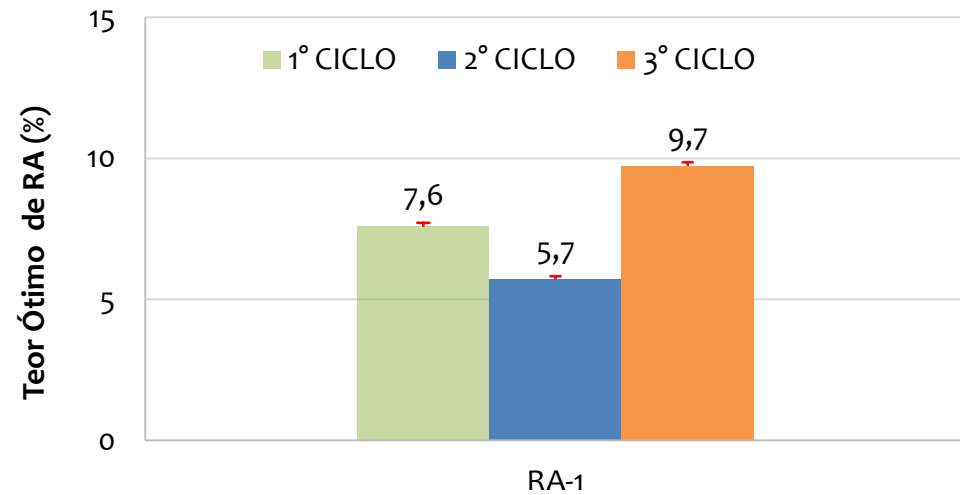


O QUE SÃO AS MÚLTIPLAS RECICLAGENS?





DEFINIR TEOR ÓTIMO USANDO BLENDING CHARTS - TEMPERATURA ALTA DO PG (High PG)

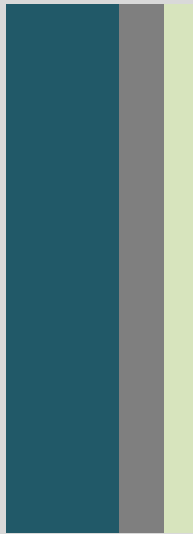




**Projeto estrutural
de pavimentos com misturas
asfálticas recicladas a frio. Como
esse pavimento irá romper?**



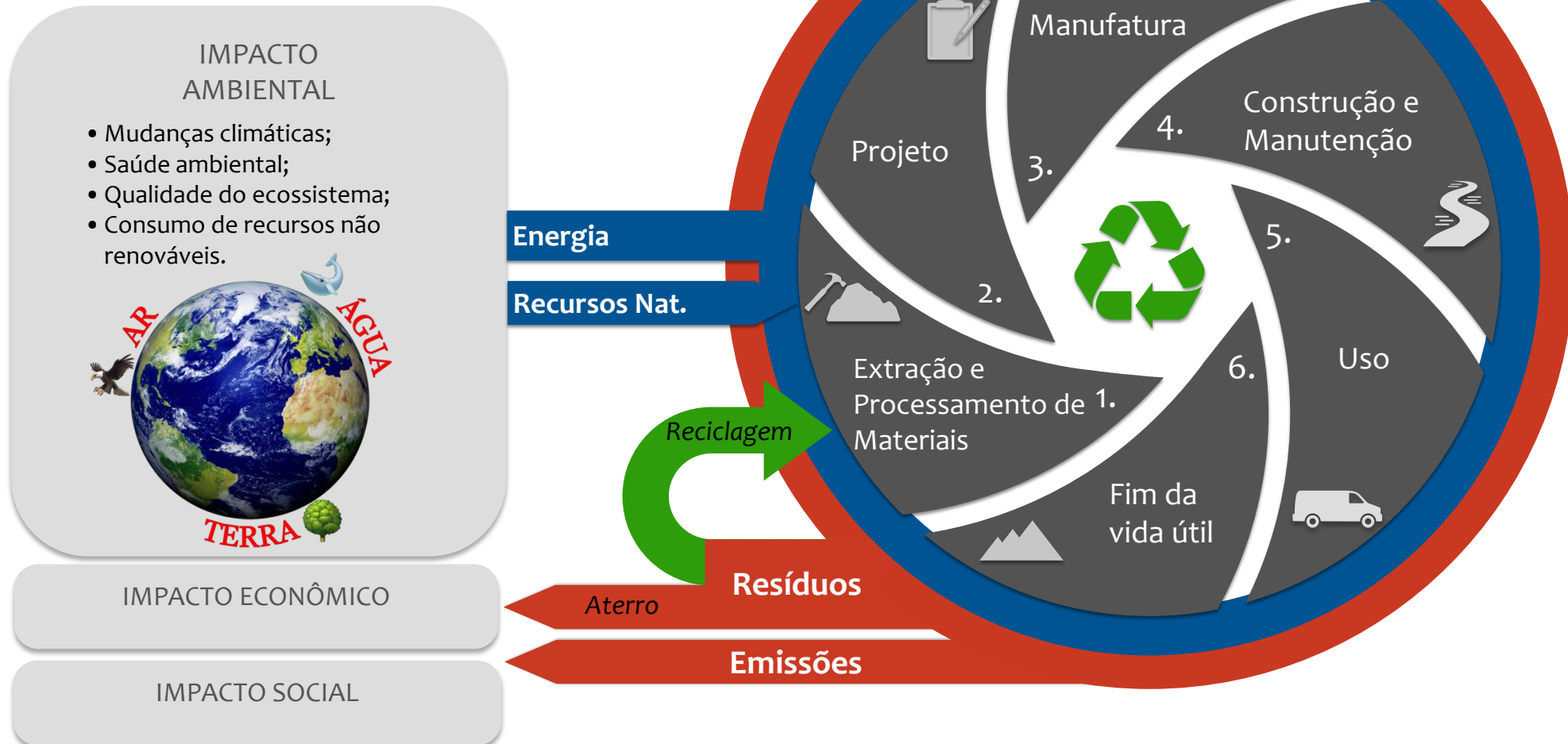
DESEMPENHO AMBIENTAL





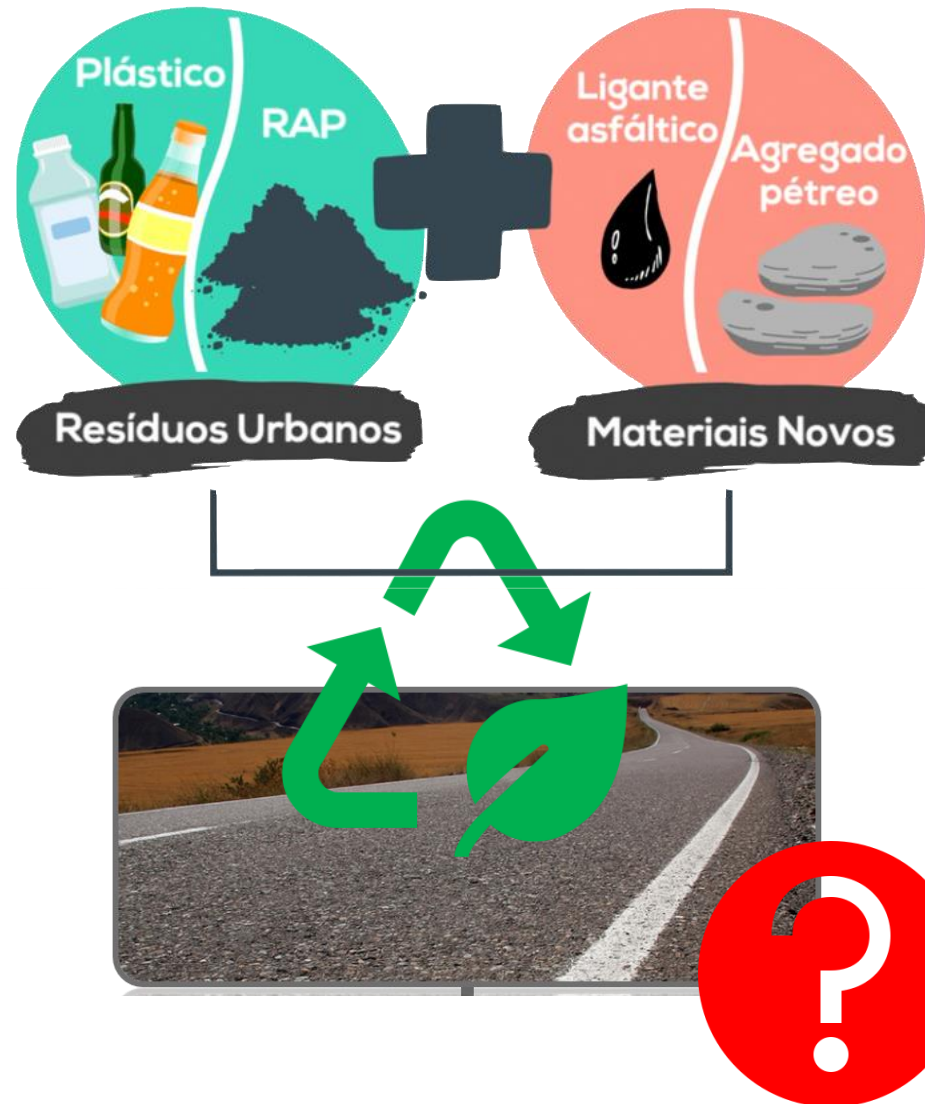
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Quantifica o impacto de cada fase do ciclo de vida de um produto, desde a extração dos materiais primários até o descarte.



Auxílio na tomada de decisões, permitindo a redução de impactos negativos. Também pode identificar processos a serem melhorados no ciclo de vida de um produto, além de possibilitar a comparação do desempenho ambiental de produtos similares.

USO DE MATERIAIS SECUNDÁRIOS





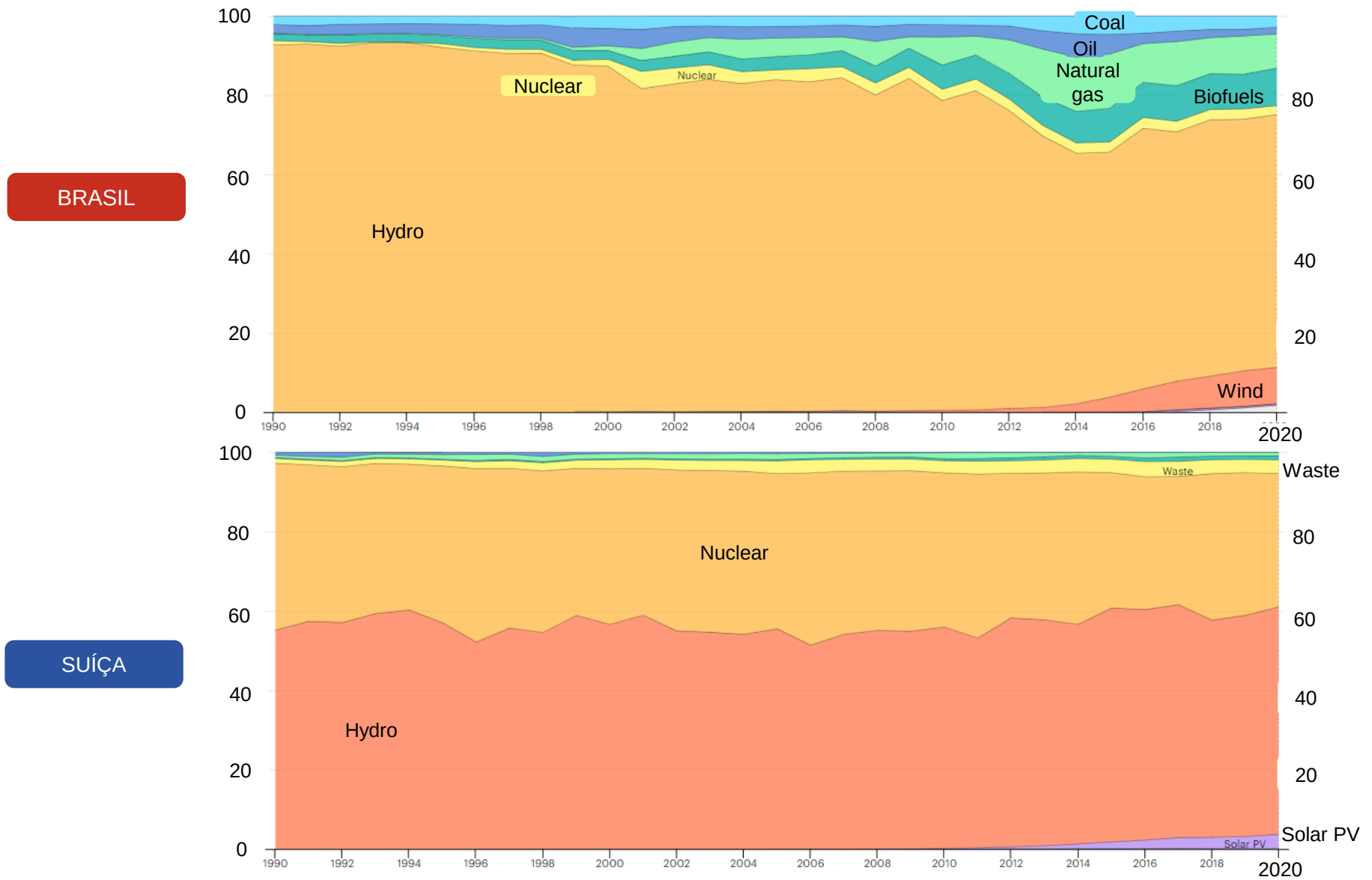
LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

A importância dos dados primários: considera a localização geográfica e características tecnológicas específicas do país em estudo. As bases de dados possuem poucos dados que representam as indústrias brasileiras.

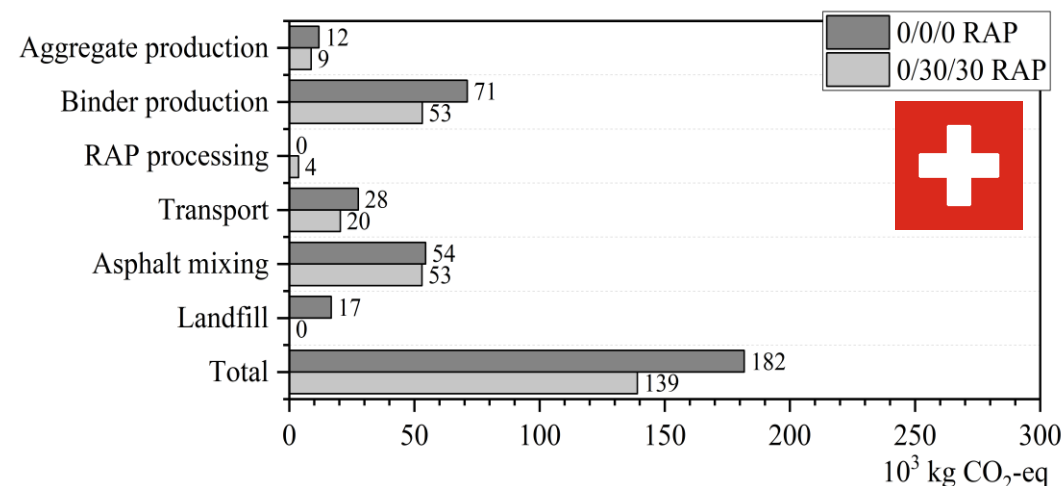
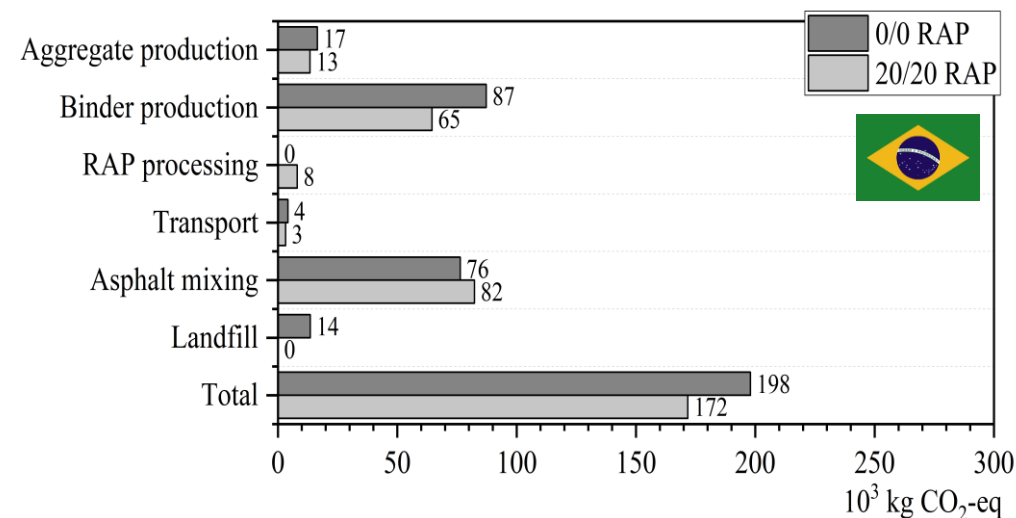
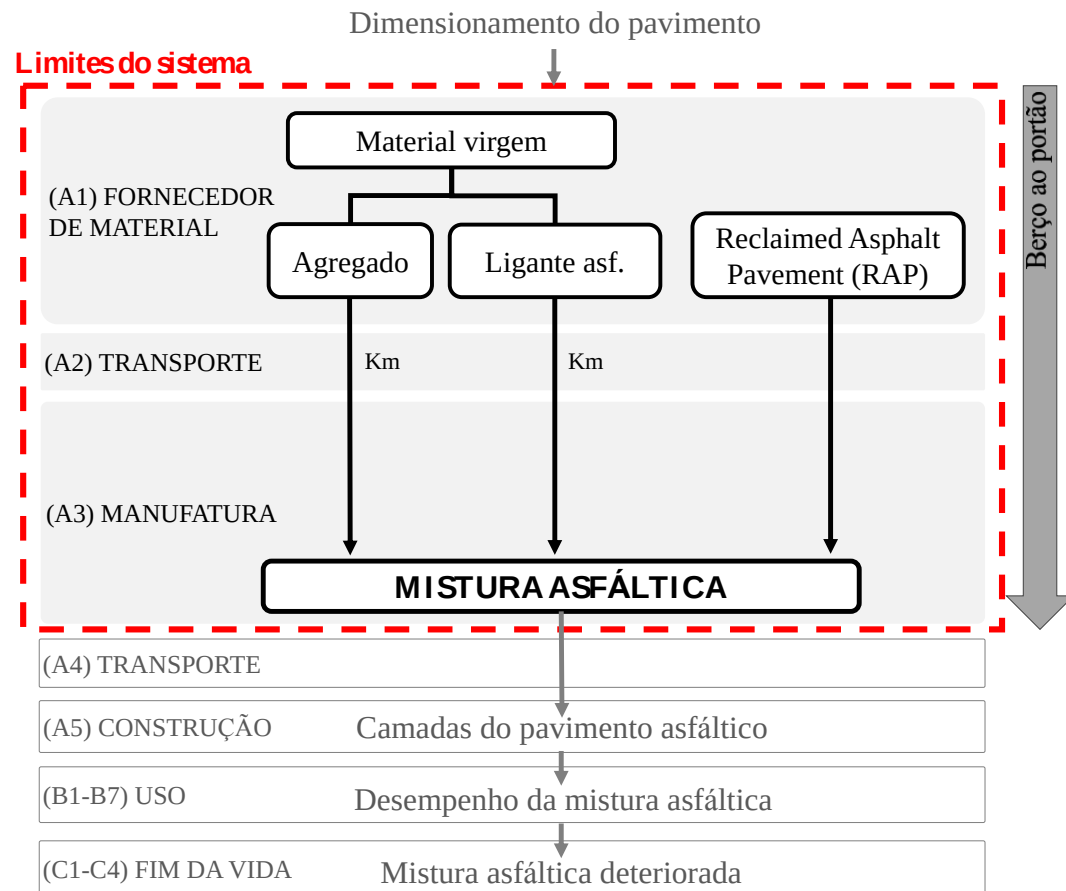


MATRIZ ENERGÉTICA

Geração de energia elétrica por fonte, 1990-2020
(Source: IEA, 2020)



LIMITES DO SISTEMA / RESULTADOS PRELIMINARES





sidac

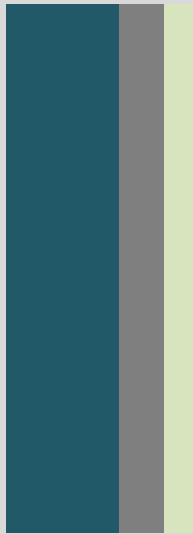
sistema de informação
do desempenho ambiental
da construção

<https://sidac.org.br/>

*“O Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção permite calcular indicadores de desempenho ambiental de produtos de construção com base em dados brasileiros e nos conceitos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A primeira versão do Sidac contempla os indicadores de **demanda de energia primária** e **emissão de CO₂**, do berço ao portão da fábrica.”*



REFLEXÕES FINAIS

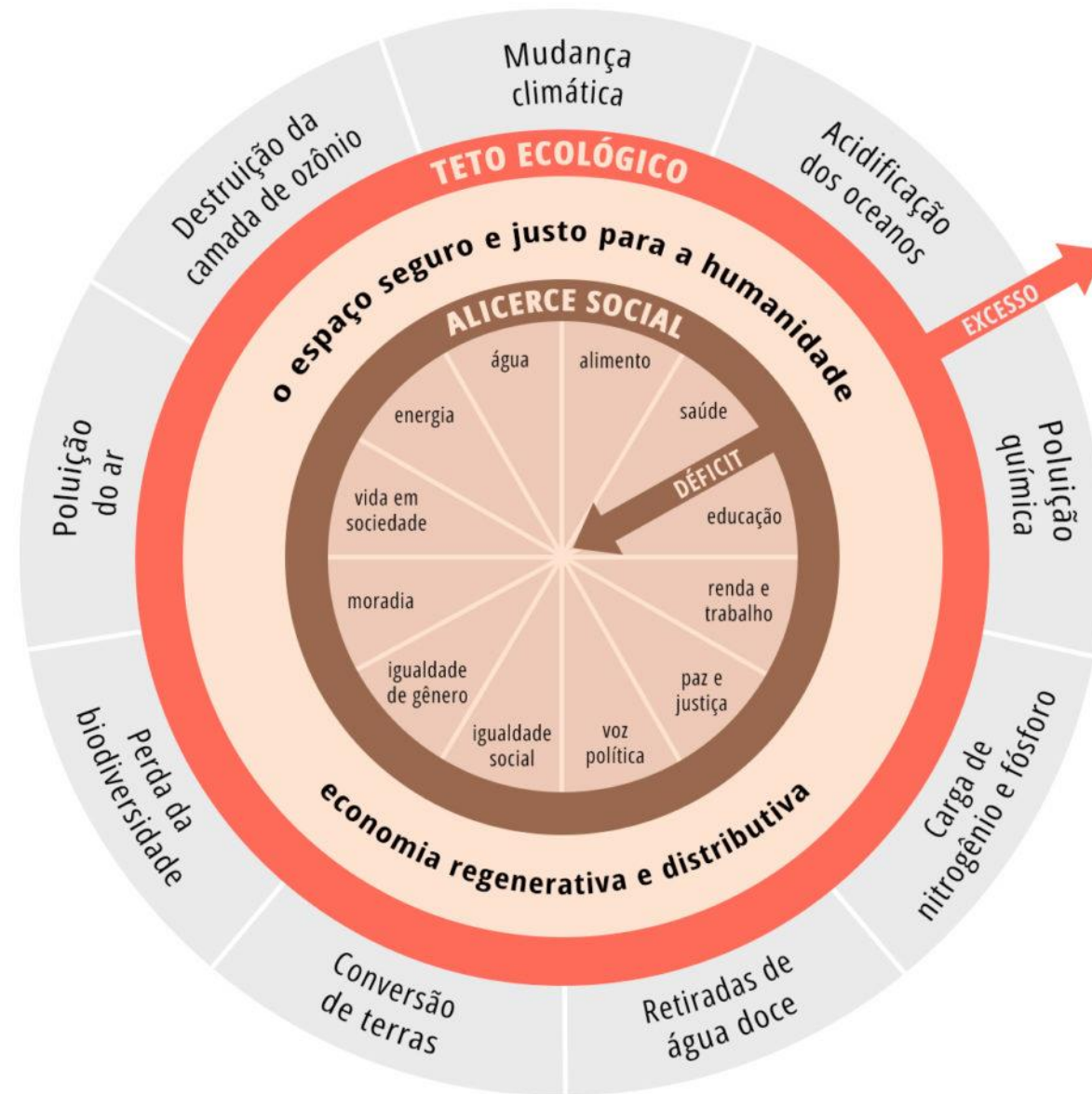


**Aprimoramento das técnicas de
reciclagem (do projeto à
execução)**

**Carbono e energia
devem definir a competitividade
das empresas.**

**Para gerenciar é necessário
definir e medir.**

Levantamento de dados primários brasileiros para ACV



“Economia Donut: Uma alternativa ao crescimento a qualquer custo”
 Kate Raworth



Luca Vasconcelos Savasini

OBRIGADA

kamilla.vasconcelos@usp.br

