



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PALERMO



CONSIGLIO NAZIONALE DEGLI INGEGNERI



**SAIV**  
Società Italiana Infrastrutture Viarie

**dj** dipartimento  
di ingegneria  
unipa

# Reimpiego di Polverino e Granulato di Gomma da Pneumatici in Disuso nelle Pavimentazioni Stradali



CONVEGNI IN MODALITÀ ON LINE

MODULO 2 - Venerdì 23 febbraio 2024, ore 15.00 - 18.00

**Materiali e Tecnologie  
per Pavimentazioni Stradali Sostenibili**

Prof. Ing. Clara Celauro  
[clara.celauro@unipa.it](mailto:clara.celauro@unipa.it)

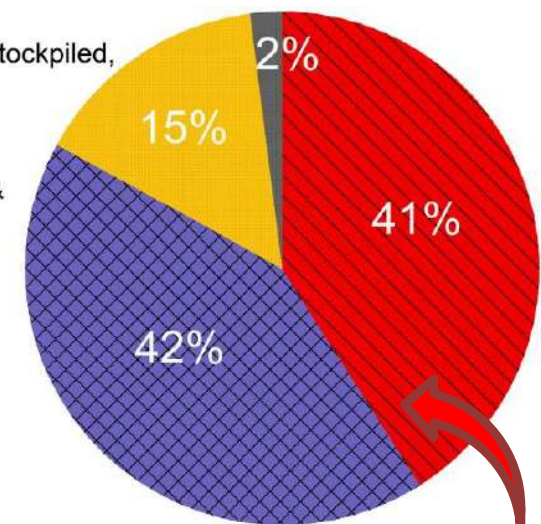
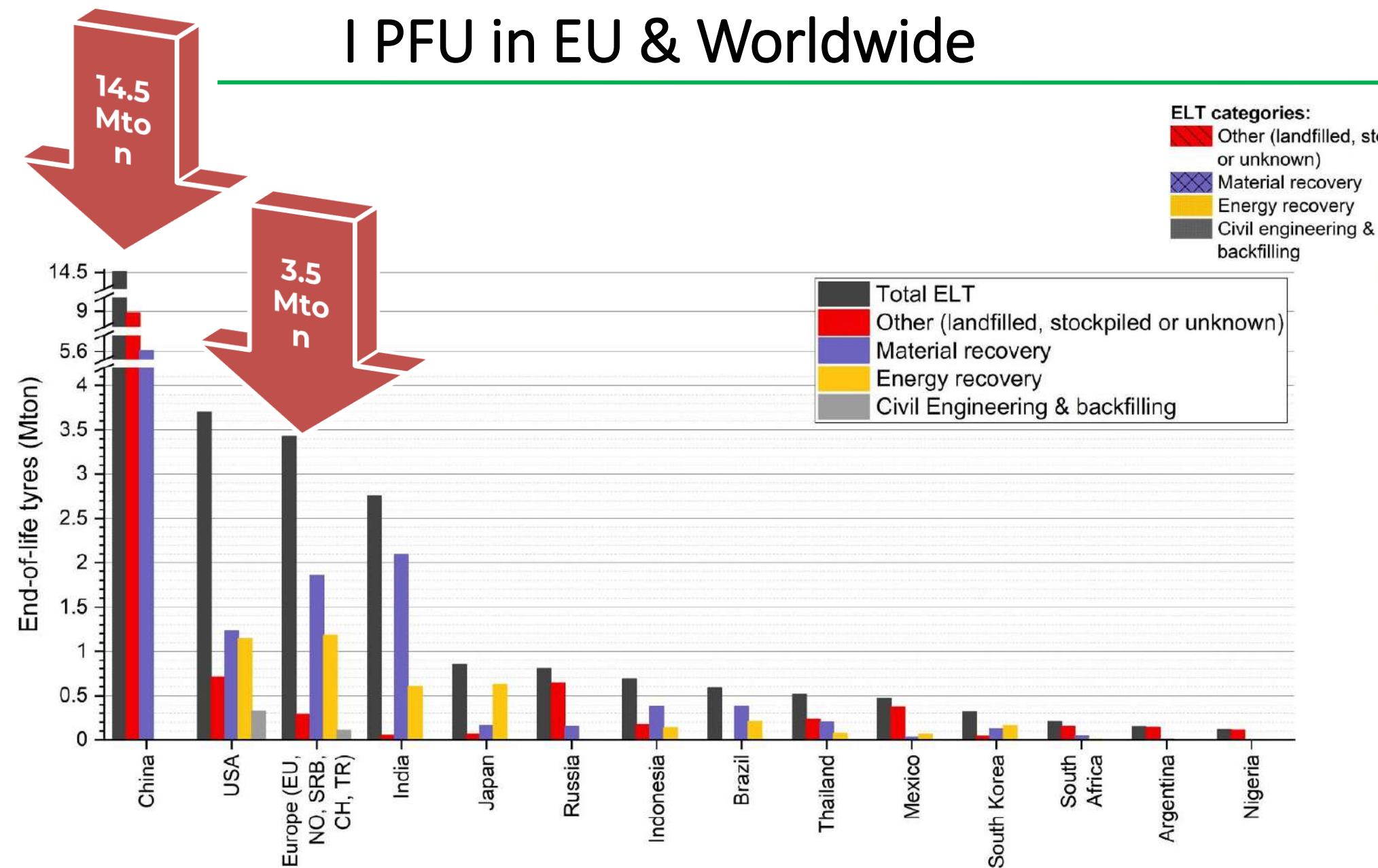
# AGENDA

---

-  **I numeri: Pneumatici Fuori Uso (PFU) in EU & Worldwide**
-  **I possibili reimpieghi sul mercato**
-  **Impiego nelle costruzioni stradali: corpo stradale e pavimentazione**
-  **Convenienza tecnica, economica e ambientale**
-  **Reimpiego di altre materie polimeriche da riciclo**
-  **Conclusioni**



# I PFU in EU & Worldwide



**Enorme  
potenzialità  
di mercato**



# I PFU in EU & Worldwide



EUROPEAN  
TYRE & RUBBER  
manufacturers'  
association

## Annex: End of Life Tyres Management – Europe – 2019

National figures  
(tonnes)

	ELT Arising (A)	ELT recovery			Unknown/Stocks (F)	ELT treated (H)=(G)/(A)
		Civil engineering, public works & backfilling (B)	Material Recycling* (C)	Energy Total Material recovery (D)=(B+C) recovery (E)**		
Austria	74.000		46.000	46.000	28.000	100%
Belgium	81.325		75.163	75.163	2.153	95%
Bulgaria	40.800		26.000	26.000	1.500	67%
Croatia	26.307		19.909	19.909	1.374	81%
Cyprus	6.900		2.500	2.500	7.500	145%
Czech Rep.	93.037		34.194	34.194	32.849	72%
Denmark	49.900		47.800	47.800	0	96%
Estonia	13.107	1.485	9.106	10.591	3.216	105%
Finland	61.060	56.802	10.733	67.535	5.958	120%
France	422.579	38.354	184.003	222.357	223.054	105%
Germany	434.000		295.000	295.000	137.250	100%
Greece	45.200		29.988	29.988	13.851	97%
Hungary (est.)	44.000		30.000	30.000	9.500	90%
Ireland	32.001		31.373	31.373	1.028	100%
Italy	384.000	842	170.000	170.842	170.000	89%
Latvia	12.500		8.000	8.000	3.500	92%
Lithuania	21.533		14.413	14.413	3.752	84%
Luxembourg	0	-	-	-	-	-
Malta	2.300		2.300	2.300		100%
Netherlands ***	87.746		79.933	79.933	7.813	100%
Poland (est.)	268.500		127.000	127.000	84.000	79%
Portugal	72.421	744	46.499	47.243	30.915	108%
Romania	51.413		544	544	50.869	100%
Slovak Rep. ELTMA only	27.475		22.675	22.675	632	85%
Slovenia	27.307		7.496	7.496	13.150	76%
Spain	238.080	202	158.125	158.327	79.753	100%
Sweden	93.532	3.013	24.623	27.636	65.896	100%
UK (estimated by UTWG)	452.659	11.065	148.643	159.708	277.283	97%
EU27+UK	3.164.282	112.507	1.652.219	1.764.725	1.254.796	95%
Norway	66.620	447	19.763	20.210	47.410	102%
Serbia (est.)	50.000		39.000	39.000	11.000	100%
Switzerland	47.200		600	600	46.600	100%
Turkey	227.509		129.619	129.619	69.009	87%
EU27+NO+CH+RS+TR+UK	3.555.611	112.954	1.841.201	1.954.154	1.428.815	95%
2018	3.573.900	96.120	1.920.100	2.016.220	1.248.880	91%
2018 vs 2019	-1%	18%	-4%	-3%	14%	4%

in 2019 23 countries with EPR legislation

\* Recycling : includes ELTs sent to granulation (1.364.930t) and the incorporation of the inorganic content of ELTs in cement manufacturing (μ 25% by weight of ELTs sent to cement kilns i.e. 476.271t)

\*\* Energy recovery : includes 75% by weight of ELTs sent to cement kilns (1.905.086tx75%) as the energy fraction of co-processing ELTs in cement kilns

\*\*\*The Netherlands: full market, beyond EPR obligation (2019)



In Italia: dal 2011 (DM 82/2011) sistema nazionale di ditte autorizzate alla raccolta dei PFU

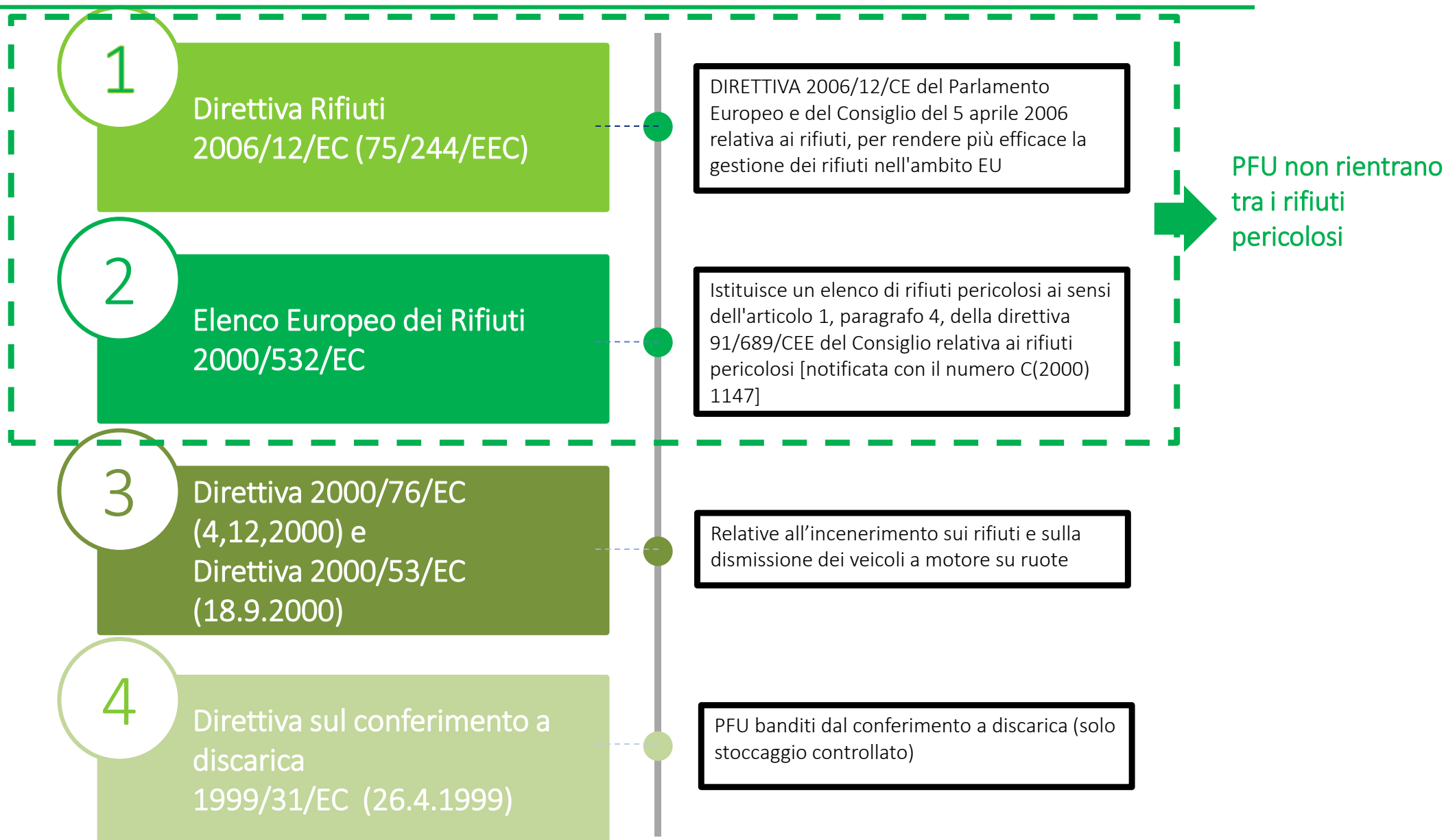


Stoccaggio PFU in centri autorizzati soltanto e inviati a siti di lavorazione del rifiuto



Certificazione del sottoprodotto (GL apposito in UNI). Ecopneus

# Riferimenti Normativi in EU



# Composizione tipica degli pneumatici

## PRODOTTI RECUPERABILI

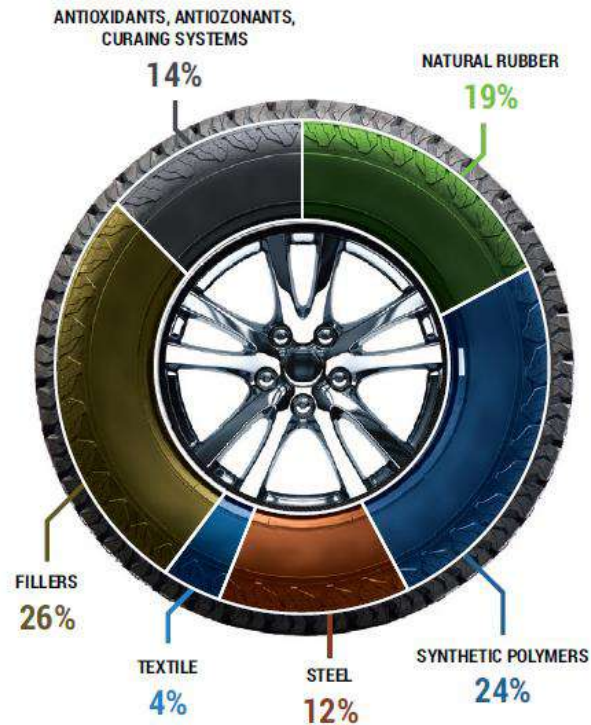
Granulati vari

Acciaio

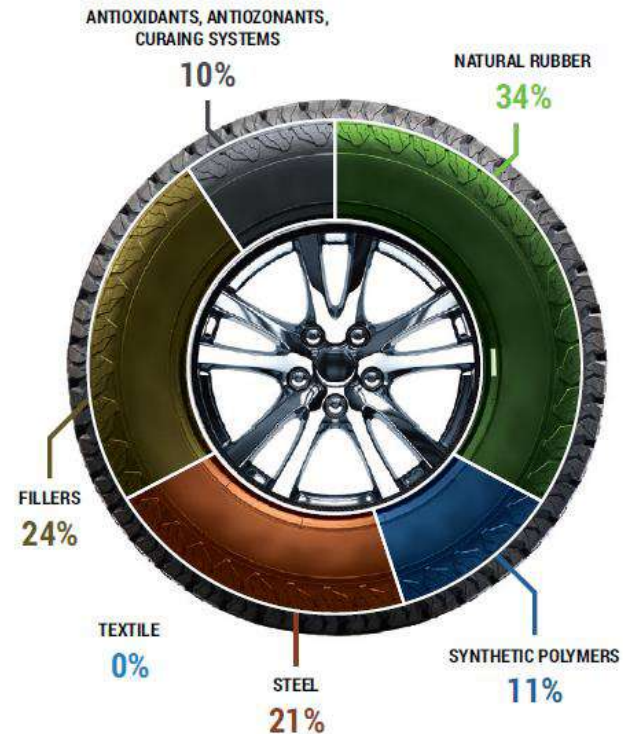
fibre di nylon

fibre tessili

## Passenger/Light Truck Tires



## Truck Tires



## FASI TRATTAMENTO

- Triturazione
- Vagliatura
- Deferrizzazione
- Granulazione
- Polverizzazione



Rubber chips



Rubber crumbs



Rubber powder



Steel wire



Nylon wire

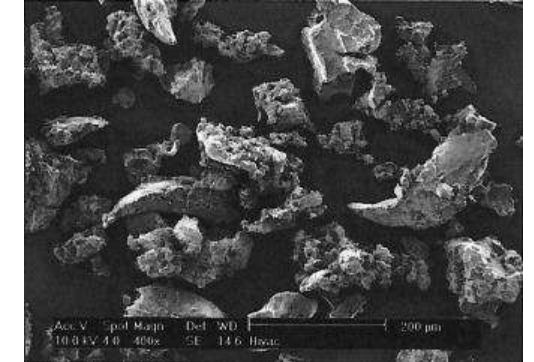


# Il recupero dei PFU

## Principali processi di granulazione

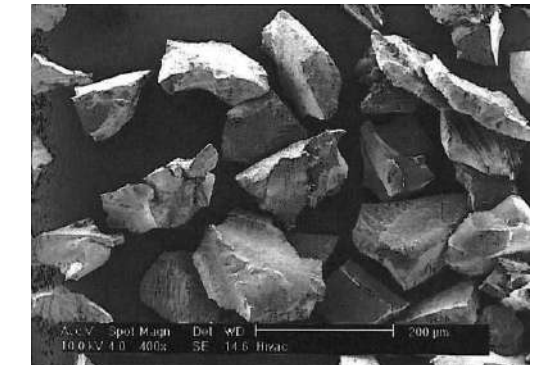
### Triturazione meccanica

- Effettuata con lame e coltelli rotanti
- Il momento più delicato è la **separazione delle fibre metalliche**, costituite in genere da acciaio.
- Il granulato ottenuto ha **granulometria variabile da 5 a 0,5 mm**.



### Processo criogenico

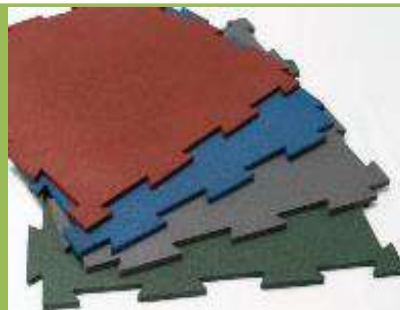
- **Macinazione** a T inferiore a quella di fragilizzazione della gomma.
- **Raffreddamento** solitamente **mediante** azoto liquido.
- **Granulato** ottenuto a **superfici praticamente lisce**.



# Possibili reimpieghi



Pannelli per edilizia



Pavimentazioni antitrauma



Muri di contenimento



Traverse in gomma riciclata



Recinzioni varie



Riempimenti non strutturali



Tubazioni varie



Campi sportivi



Arredi urbani per parchi



# Impiego nelle costruzioni stradali: corpo stradale

Tarrtown Bridge in  
Pennsylvania, State Route 4023

**rilevato** alleggerito con TDA  
adiacente alle **spalle**

557,000 PFU (5,570 tons)



## Tire Derived Aggregate (TDA)

Utile nella costruzione di **rilevati alleggeriti** su suoli compressibili, in **testa di pendii instabili** o per l'uso a **tergo di spalle di ponte** e di muri di contenimento.

### VANTAGGI:

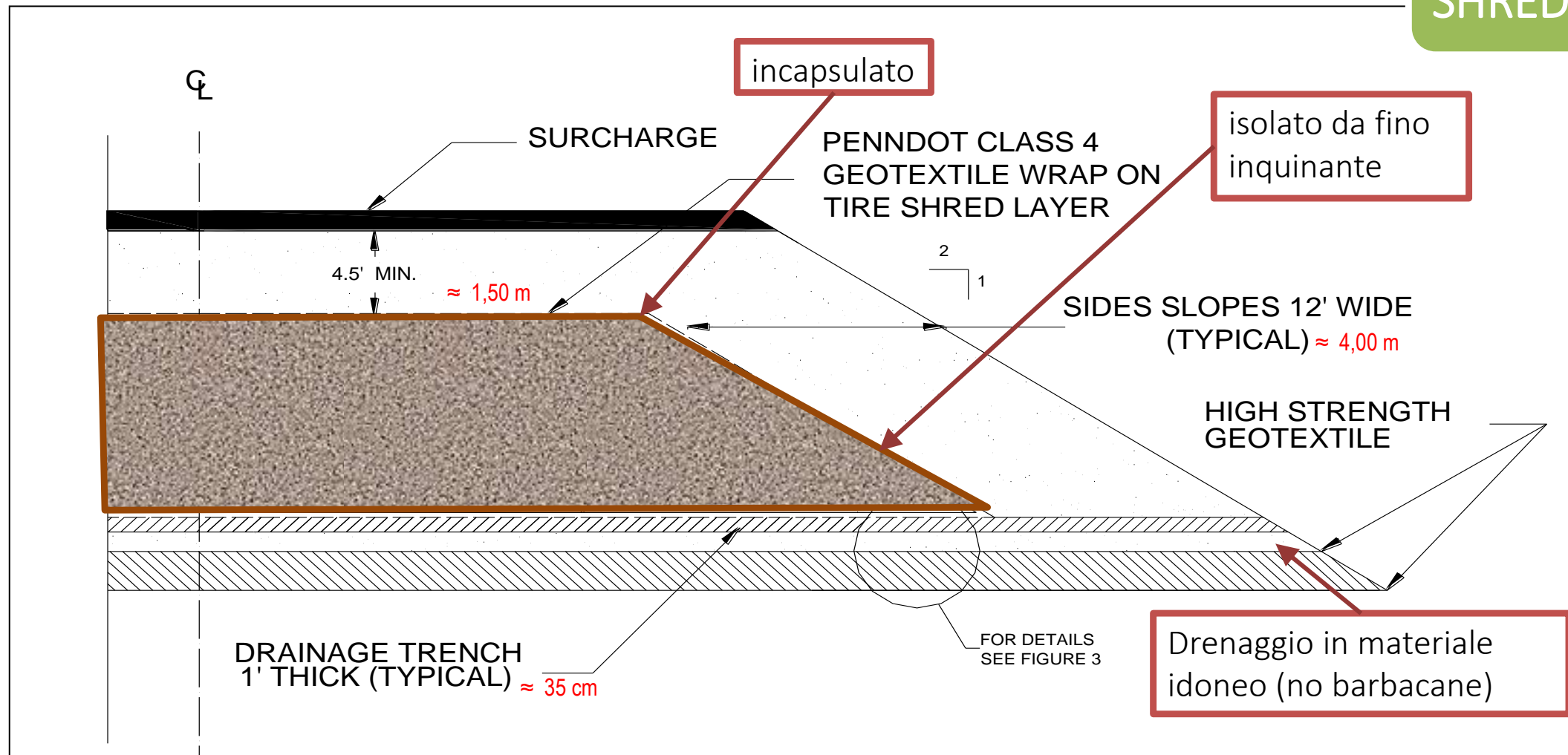
- **Pesi per unità di volume** compattata dei ( $\sim 800 \text{ kg/m}^3$ ) **notevolmente inferiori** di quelli delle terre naturali in opera ( $\sim 1900 \text{ kg/m}^3$ );
- **elevata conduttività idraulica** ( $1 \div 10 \text{ cm/s}$ ) e **bassi valori di spinta**
- **costo pari al 50%** di quello di convenzionali materiali alleggeriti [scisti espansi, geofoam EPS (polistirene espanso) e XPS (polistirene estruso)]
- possibilità di **ridurre** o eliminare il **ricorso alla costruzione per fasi**, grazie alle ridotte pressioni di sovraccarico esercitate sui suoli

# Impiego nelle costruzioni stradali: corpo stradale

## ES: Sezione tipo di strato di rilevato SINGLE LAYER in TDA da PFU

Il nucleo in TDA da PFU è incapsulato da terra naturale in opera su tutti i lati, con drenaggio alla base

SINGLE  
SHRED LAYER

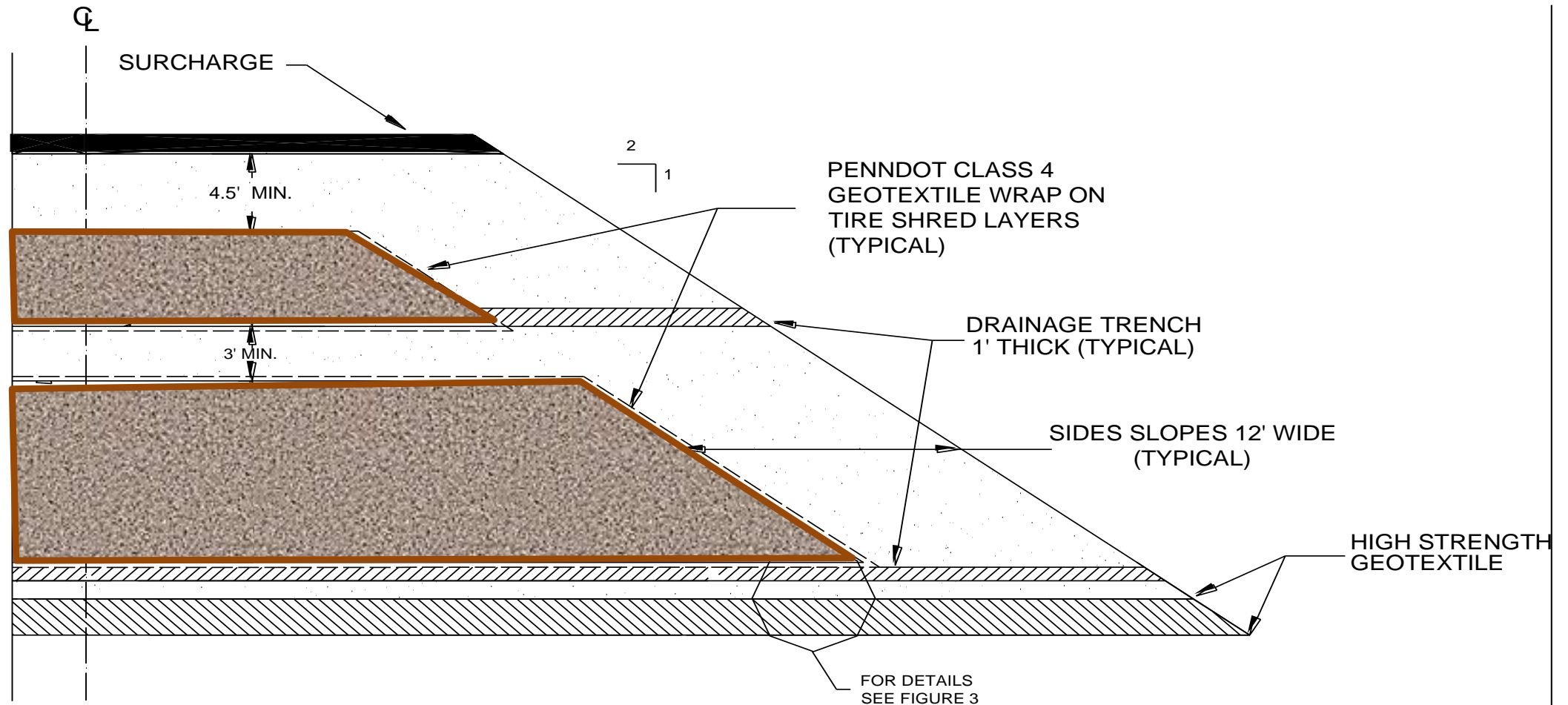


# Impiego nelle costruzioni stradali: corpo stradale

## ES: Sezione tipo di strato di rilevato DUAL LAYER in TDA da PFU

Stessa tecnica del SINGLE LAYER: strato di terra interposto tra 2 in TDA

DUAL SHRED  
LAYER





# Impiego nelle costruzioni stradali: corpo stradale

AMPIA ESPERIENZA: PennDOT ha codificato norme tecniche di capitolato per la valutazione dell'idoneità all'impiego (**Special Provision (SP), Item 9203-0100**) e per le caratteristiche delle soluzioni di progetto (**SP, Item 9703-0100**)

## CARATTERISTICHE TDA

- **Dimensioni:** non oltre l'1% & 10% (in peso); D max > 46 & 30 cm rispettivamente
- **Metalli sporgenti:** almeno il 76% & 90% (in peso) dei PFU in brandelli devono presentare frammenti metallici incapsulati nella gomma che non sporgono > 2,54 & 5 cm dal bordo dell'elemento di gomma stesso
- **Acciaio d'armatura:** frammenti metallici meno dell'1% in peso
- **Materiali pericolosi:** esente da contaminazione di oli, gasoli, carburanti diesel, fluidi idraulici, grassi, ghiaccio, neve, pneumatici bruciati, legno, materia organica (per evitare fenomeni di ossidazione)

## Assortimento granulometrico:

Dimensioni setaccio	8" (200mm)	3" (75mm)	1.5" (37,5mm)	No. 4 (4,75mm)
% Passante	75-100%	50% max	25% max	1% max

# Impiego nelle costruzioni stradali: corpo stradale

## ALCUNI PARAMETRI DI PROGETTO

- 100 PFU = 1 ton
- Peso volume compattato -  $\sim 800 \text{ kg/m}^3$
- Peso secco volume compattato -  $\sim 800 \text{ kg/m}^3$
- angolo di attrito interno ( $\phi'$ ) -  $27^\circ$  (toe failure)
- angolo di attrito interno ( $\phi'$ ) -  $25^\circ$  (deep seated)
- Coesione ( $c'$ ) -  $70 \text{ lb/ft}^2 \sim 0,034 \text{ kg/cm}^2$  (toe failure)
- Coesione ( $c'$ ) -  $0 \text{ lb/ft}^2$  (deep seated)

## ACCORTEZZE E LIMITAZIONI

- **necessità di costruzione con sovraccarico** (natura compressibile ), per raggiungimento dello spessore finale
- sovraccarico dipende dallo spessore dello strato e dalle pressioni da indurre (**Guida PennDOT per il calcolo**)
- **mai su sottofondi gelivi**
- quota minima: 65 cm al di sopra della quota massima attesa dalla falda idrica stagionale, considerando tempi di ritorno degli eventi di piena di 100 anni
- posa in opera operazione delicata, per evitare la contaminazione con materie estranee a causa dei mezzi d'opera

# Impiego nelle costruzioni stradali: pavimentazione

## TECNOLOGIA SPERIMENTATA DA DIVERSI DECENNI

Charles Goodyear sviluppa il processo di vulcanizzazione della gomma naturale

1839

1st symposium on Rubber in Asphalt presso l'Asphalt Institute di Chicago

1960

In Svezia viene sviluppato il DRY process, con il nome commerciale "Skega Asphalt" o "Rubit".

Anni '60

Brevetto del McDonald Process (tipo WET).  
L'Arizona DOT sperimenta in campo le prime membrane SAMI

1968

Dal 2010

R&D: evidenze di campo di vantaggi tecnici, economici e di sostenibilità

2000-2010

Sviluppo Terminal Blend Dry : frazioni fini (0.600 ÷ 0.420 mm) con pre-trattamento. Addizione e non sostituzione in curva

1995-2005

Modifiche alle tecnologie sulla scorta dei risultati di campo. Sviluppo del Wright process (ulteriore processo wet precursore del Terminal Blend)

1991

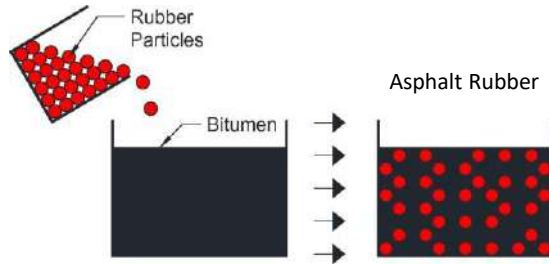
Intermodal Surface Transportation Efficiency Act  
1991: obbligo all'uso di Rubberized asphalt per le autostrade federali.  
Dal 5% nel 1994 al 20% in 1997 (incremento 5%/anno)

Anni '70

Dry process in US ("PlusRide").  
Sezioni in Alaska DOT (1976), Minn (1979), Wash State DOT (1977), Caltrans (1983), NY (1989).



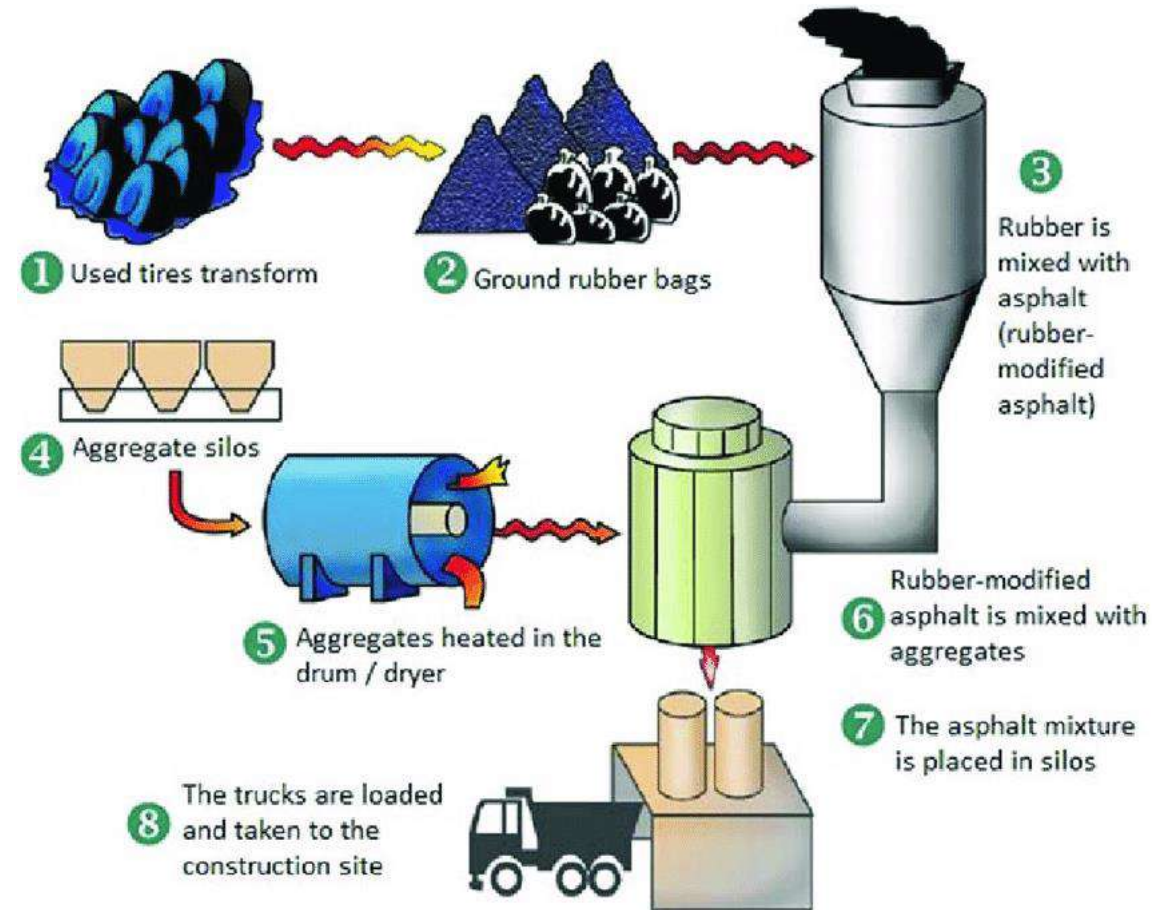
# Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi



Si ottiene l'ASPHALT RUBBER (ASTM D6114): bitume miscelato a gomma a temperature elevate.

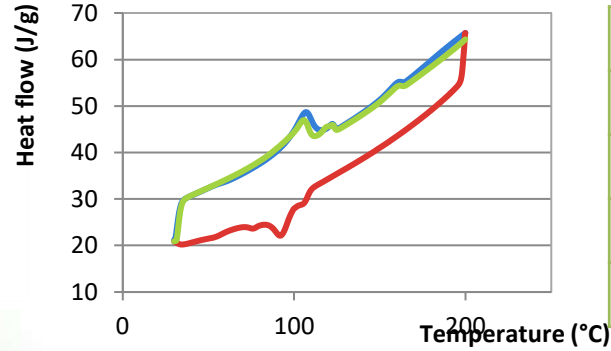
Il legante ottenuto deve risultare idoneo al confezionamento dei conglomerati bituminosi stradali per prestazioni e stabilità.

Temperature di processo	175-190°C
tempi	30-60 minuti
V miscelazione	> 450 rpm
Dosaggi	15 ÷ 25% peso di bit
Dosaggi per tonn mix (per b'=5% e CRM = 20%)	10 kg



**Processo Terminal blend:** evoluzione del WET. L'Asphalt Rubber è prodotto e posto in stoccaggio in impianto e trasportato ai siti di lavoro solo quando ne è richiesta la fornitura. L'impianto necessita di apposita unità di miscelazione ad alto taglio e di sili di stoccaggio del bitume con agitazione, con alimentatore della gomma in granulo.

# Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi

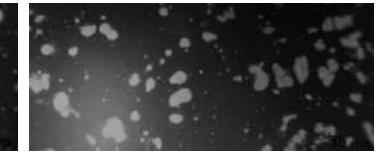


## CONDIZIONI DI PROCESSO TIPICHE

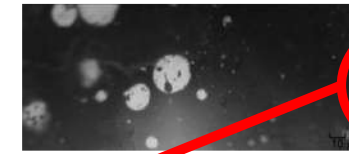
Temperature	Circa 190° C
tempi	> 1h
V	3000 rpm
Dosaggi	> 15% peso di aggregato
Dosaggi per tonn mix	19 kg



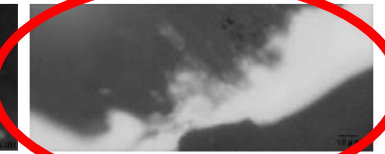
LDPE



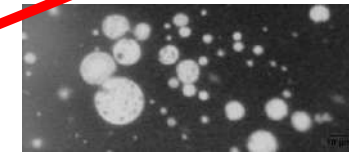
LDPE/EVA



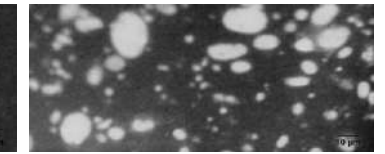
HDPE



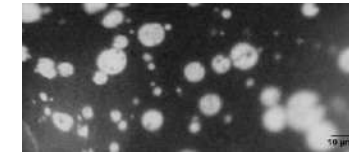
CRM



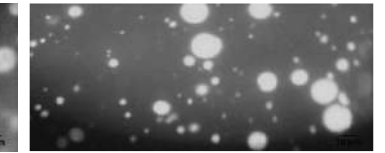
LDPE post RTFO



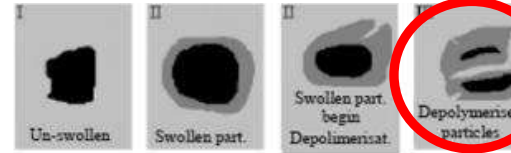
LDPE/EVA post RTFO



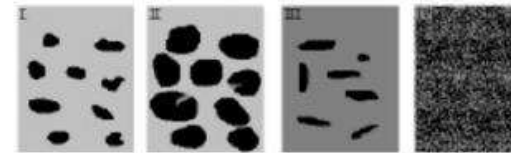
HDPE post RTFO



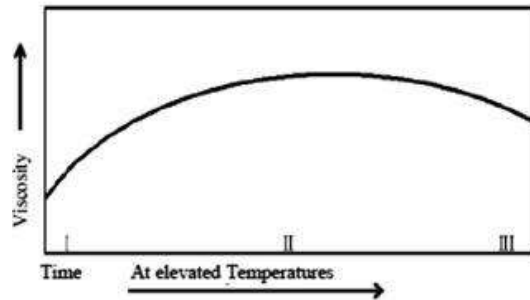
CRM post RTFO



(c) Particles size



(b) Binder matrix



(a) Binder viscosity

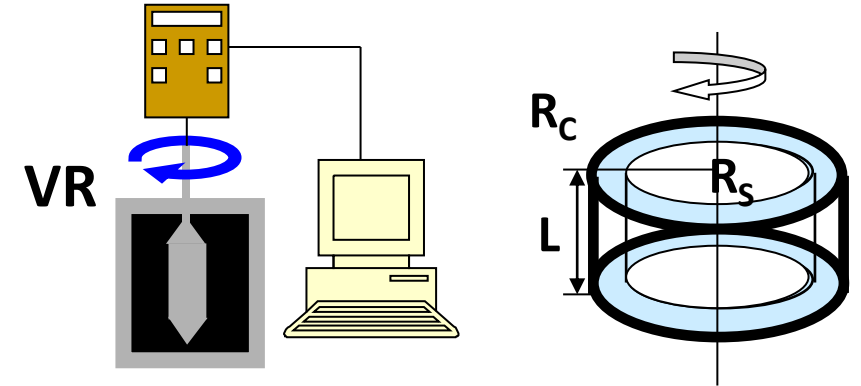
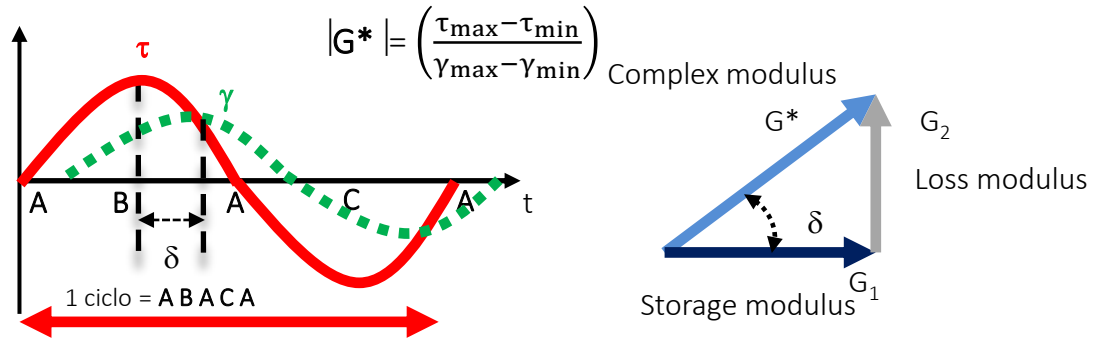
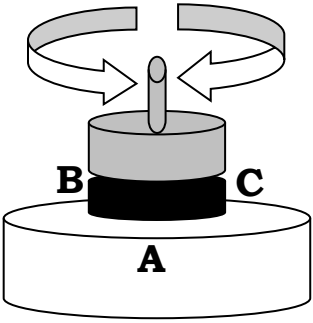


## 1. CARATTERIZZAZIONE COMPONENTI

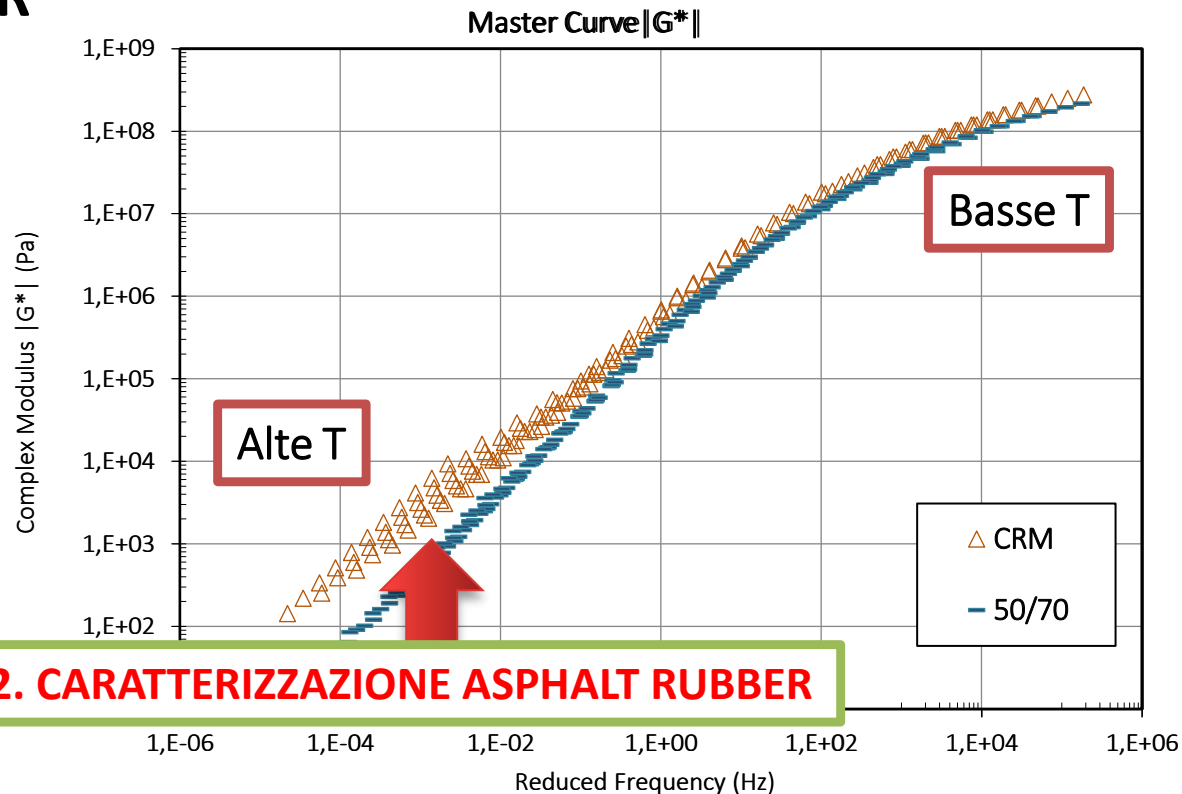
Tabella . Caratterizzazione bitume di base e dopo modifica con gomma e polimeri

Requirement characteristics	Pen 25°C	T <sub>R&amp;B</sub>	Pen 25°C	T <sub>R&amp;B</sub>	Δ T <sub>R&amp;B</sub>	R <sub>PEN</sub>
	Pre-RTFO		Post-RTFO			
Standard	EN 1426	EN 1427	EN 1426	EN 1427	EN 12607-1	EN 12607- 1
BITUMEN 50/70	68	50	44	54	4	64.71
LDPE	35.7	56	23	62.25	6.25	64.43
HDPE	25.7	58	18.4	64.25	6.25	71.6
LDPE-EVA	35	61	25	63	4.2	71.43
CRM	45	58	28	63	5	62.22

# Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi



DSR



## 2. CARATTERIZZAZIONE ASPHALT RUBBER

MISCELE WET	Dosaggio AR
Open graded (ARFC)	9 – 10 %
Gap Graded (ARAC)	7.5 – 8.5 %

Aumento  
rigidezza alle  
alte T

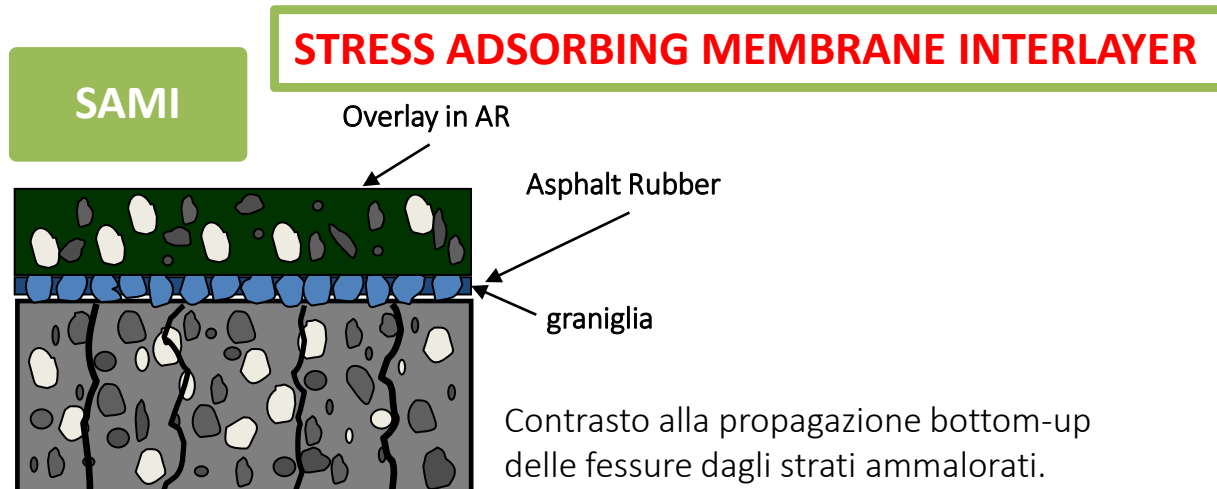


Migliora  
resistenza  
all'accumulo  
di ormaie





# Impiego nelle pavimentazioni: manutenzione esistenti



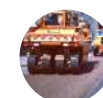
Preparazione superficie (spazzatrice)



Spandimento legante



Spandimento graniglia

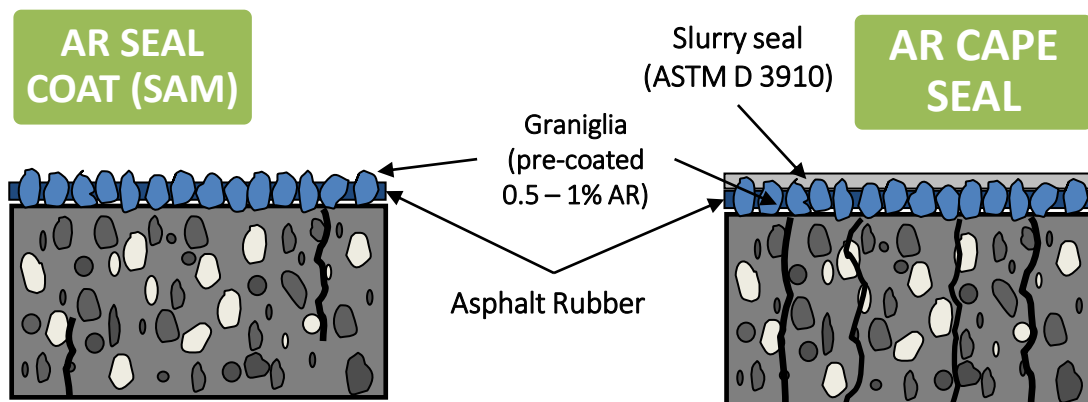


Compattazione (rulli a pneumatico):  
avanzamento in retromarcia



Apertura al traffico/overlay

## TRATTAMENTI SUPERFICIALI



ASTM D 7564, Standard practice for Construction of Asphalt Rubber Cape Seal

### Assortimento Aggregati

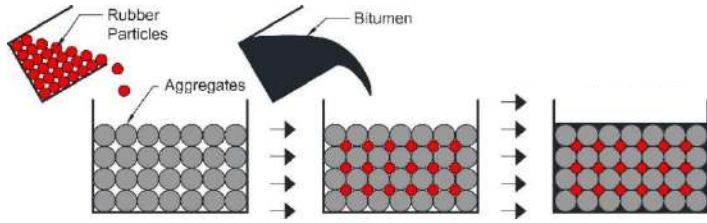
Sieve Size	Type A % Passing	Type B % Passing
19.5 mm	100	100
12.5 mm	95-100	95-100
9.50 mm	0-20	70-85
4.75 mm	0-5	0-15
2.36 mm	0-2	0-5
0.075 mm	0-1	0-1

### Tassi di spandimento

Dosaggio AR (L/m <sup>2</sup> )	
PCI = 25 - 35	2.5-3.0
PCI = 35 - 55	2.0-2.5
Dosaggio granulato (kg/m <sup>2</sup> )	
SEAL COAT	
PCI = 25 - 40	12.0-16.0 (type A)
PCI = 40 - 55	10.5-13.5 (type B)

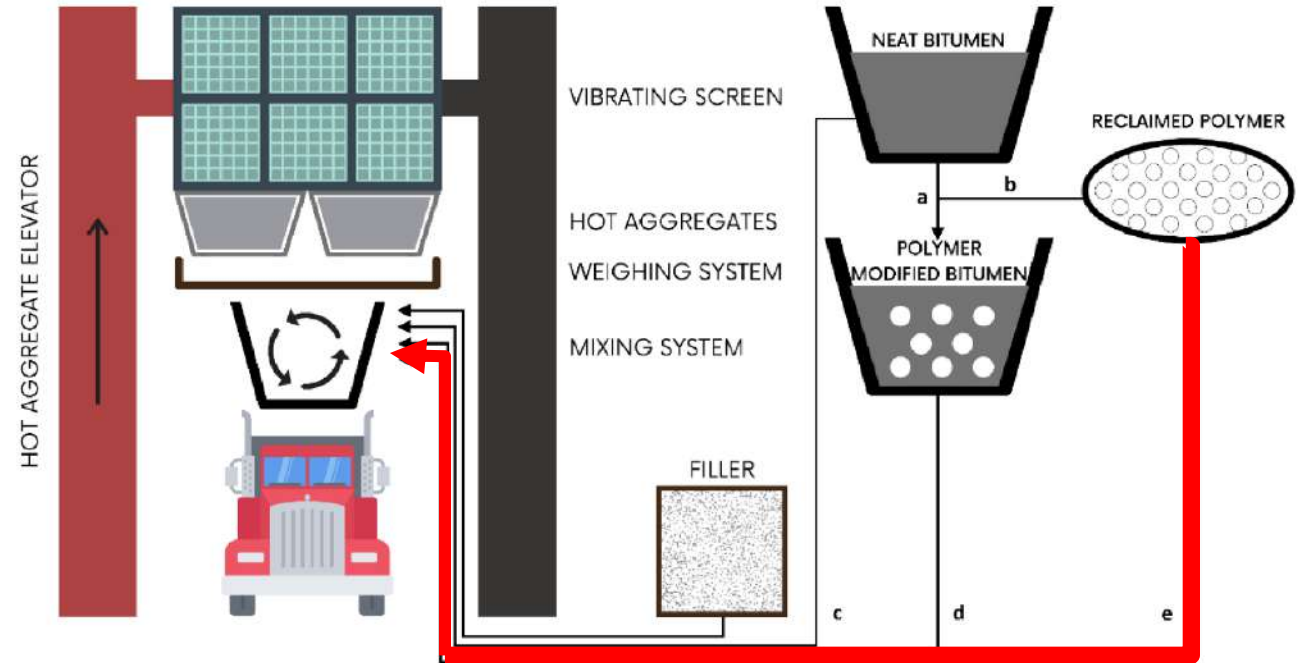
Recupero dell'aderenza e dell'impermeabilità della superficie stradale

# Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi



La gomma viene aggiunta all'aggregato, prima della miscelazione col bitume. L'impianto non necessita particolari modifiche

Temperature di processo	5°- 10° T in più di Tmix senza
tempi	Come mix senza (se possibile 45 sec in più)
Dosaggi	2 ÷ 5 % peso di aggregato
Dosaggi per tonn mix (per b'=5% e CRM = 2%)	19 kg



Solo necessità di feeder  
CRM

Il **mix design** preliminare di laboratorio (**FONDAMENTALE**) può avvenire per:

- **sostituzione volumetrica**: viene sostituita parte di pari dimensioni della curva granulometrica
- **semplice addizione**: la frazione di gomma viene aggiunta allo scheletro litico, quindi aumenta la superficie complessiva da ricoprire in miscela

Dati i brevi tempi di miscelazione col bitume, l'interazione del granulato di gomma con il legante è relativamente modesta ma beneficia di prolungati tempi di maturazione

# Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi

Tabella - Assortimento granulometrico gomma impiegata

Dimensione nominale (mm)	% di passante		
	Gomma utilizzata	PlusRide™ (Dry)	Miscele Wet
15,8	-	100	-
9,52	-	60-80	-
6,5	-	30-42	-
2,00	100	19-32	100
1,00	100	-	75-100
0,60	-	13-25	25-100
0,42	15-20	-	-
0,30	-	-	0-45
0,177	0-1	-	0-10
0,075	0	8-12	0

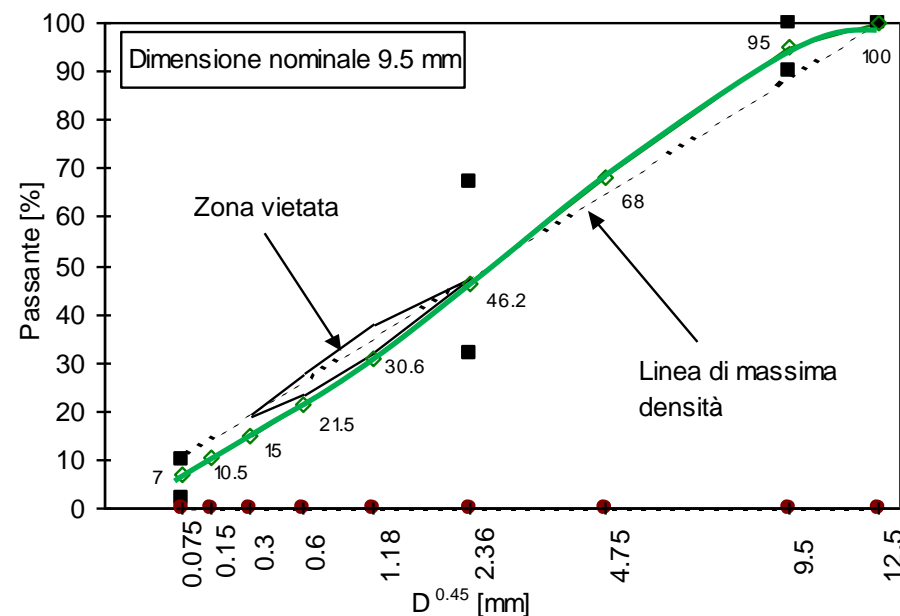


Figura 1 – Assortimento granulometrico miscela aggregati secondo SUPERPAVE



## 1. CARATTERIZZAZIONE COMPONENTI

Bitume	Pen 25°C [dmm]	Temp. P.A. [°C]	IP secondo Pfeiffer	Gruppi componenti [%]				$\frac{\% \text{Asfalteni}}{\% \text{Aromatici}}$
				Asfalteni	Saturi	Polari	Aromatici	
I 50/70	56	48.5	-1.18	26.6	4.6	15.7	53.1	0,50
A 70/100	82	46.5	-0.79	21.2	4.3	17.9	56.6	0,37

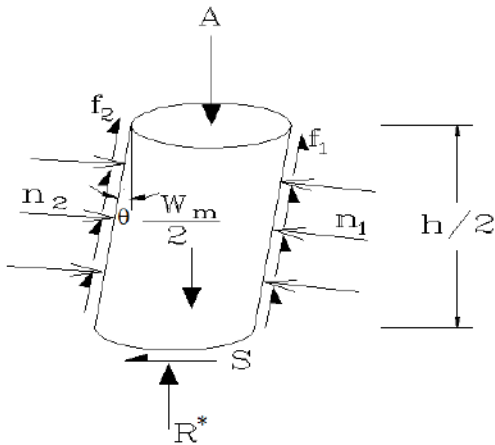
Tabella - Caratteristiche e gruppi componenti dei bitumi utilizzati



# Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi

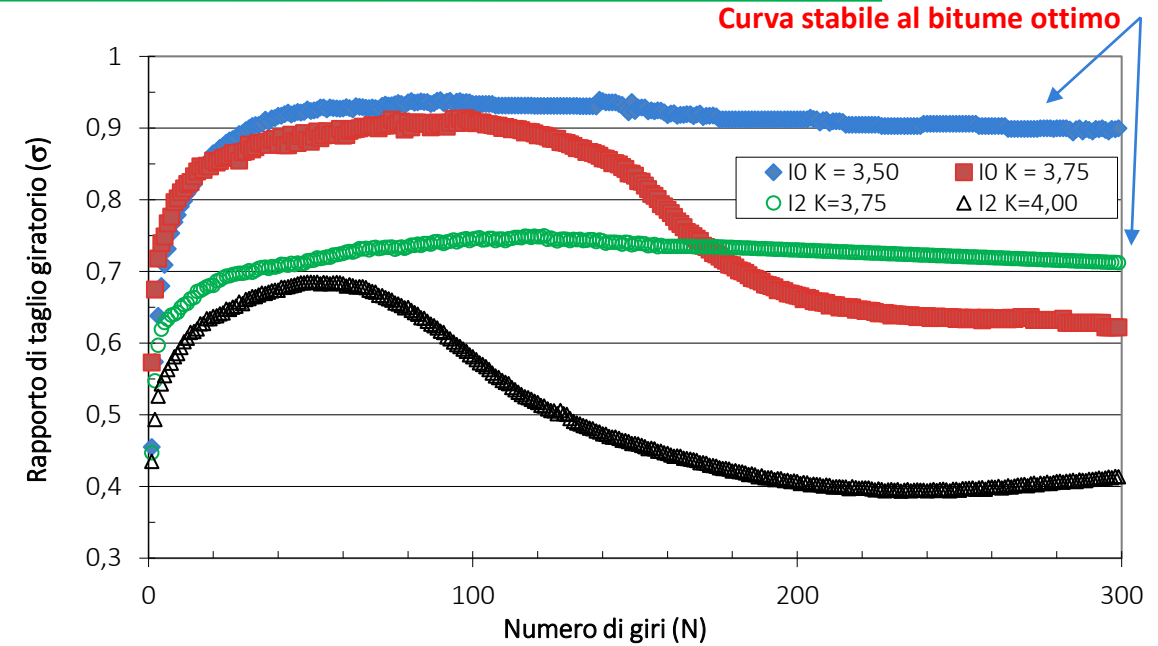
Valori Stimati	%AC @ 4% Va	%G <sub>mm</sub> * @ N <sub>init</sub> = 8	%G <sub>mm</sub> * @ N <sub>design</sub> = 100	%G <sub>mm</sub> * @ N <sub>max</sub> = 159	%VMA @ N <sub>design</sub>	%VFA @ N <sub>Design</sub>
Criteri volumetrici di progetto		< 89	= 96	< 98	> 15	73<VFA<76
Bitume "A" (70/100)	5,6	88,7	96,0	97,9	18,6	78,5
Bitume "I" (50/70)	5,7	88,7	96,0	97,2	18,8	78,7

(\* Gmm = Peso specifico massimo teorico = 2,518 gr/cm<sup>3</sup>)

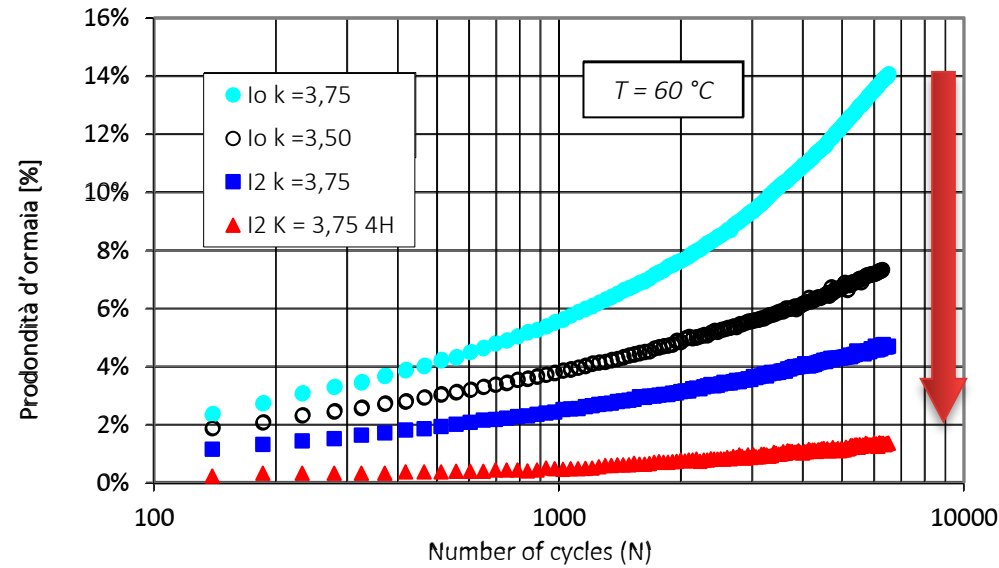
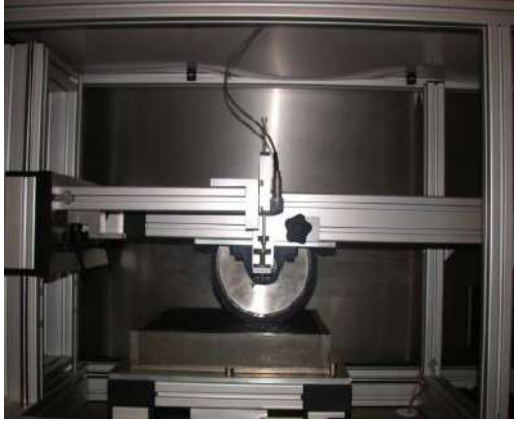


## 2. MIX DESIGN VOLUMETRICO

Miscela(*)	CRM [%]	b [%]	Modulo di ricchezza K	Va		MVA	
				Media [%]	Coeff. variaz. [%]	Media [g/cm <sup>3</sup> ]	Coeff. variaz. [%]
I0 K=3,50	0	5,12	3,50	4,13	11,03	2,498	0,47
I2 K=3,75	2	5,63	3,75	3,85	24,25	2,421	0,97
I2 K=3,75 4H	2	5,63	3,75	3,80	19,36	2,422	0,76
A0 K=3,50	0	5,12	3,50	3,75	7,96	2,519	0,31
A2 K=3,75	2	5,63	3,75	3,62	12,10	2,427	0,45
A2 K=3,75 4H	2	5,63	3,75	3,43	10,96	2,431	0,39



# Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi



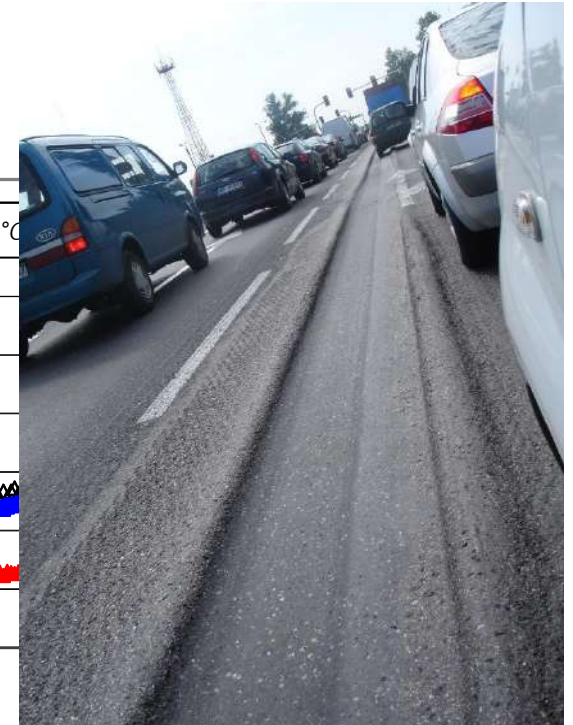
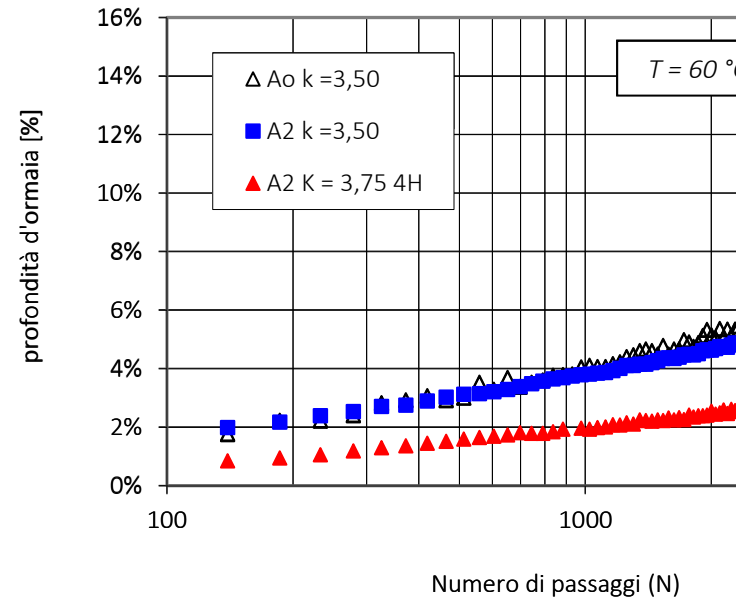
Aumento  
rigidezza alle  
alte T

=

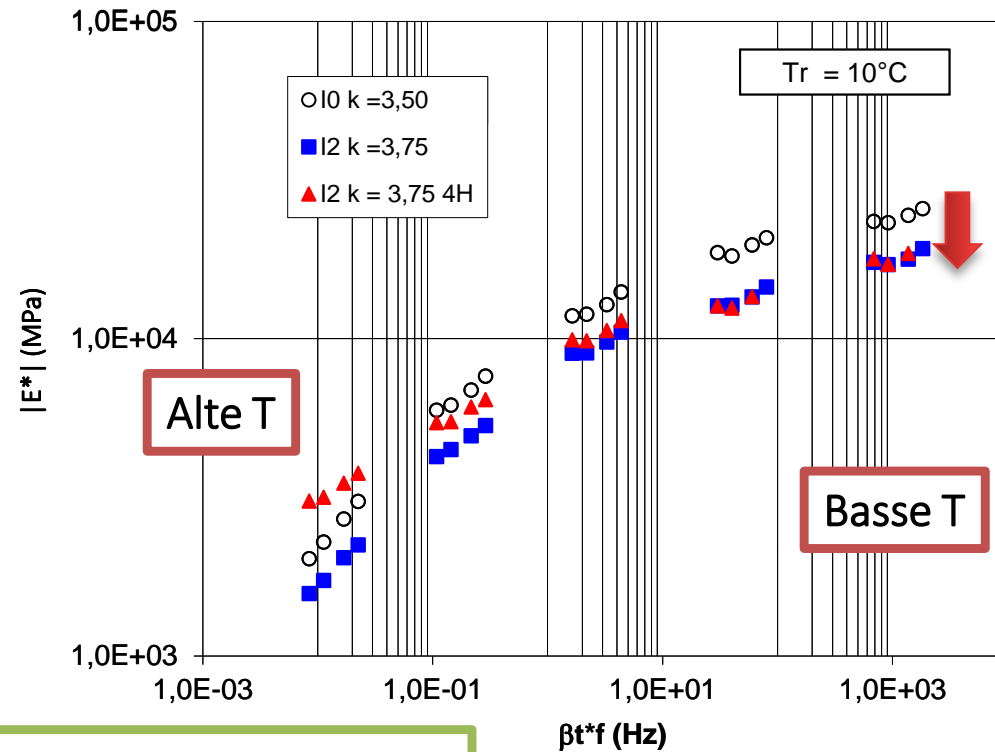
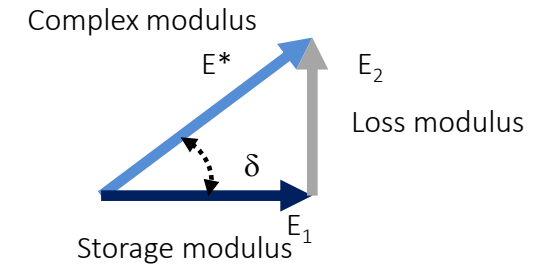
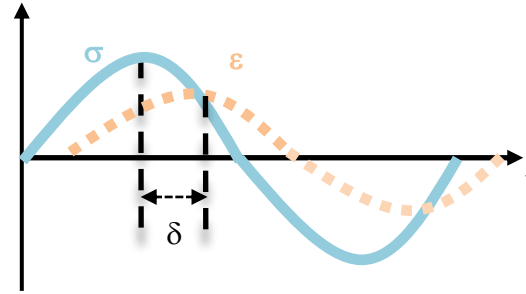
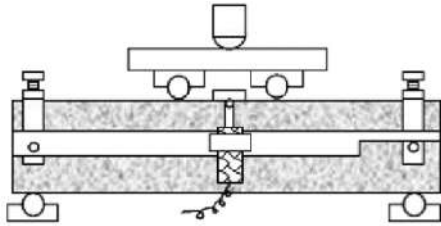
Migliora  
resistenza  
all'accumulo  
di ormaie

Miscela	CRM [%]	b [%]	Rut Depth (mm)
I0 K=3,50	0	5,12	3,66
I0 K=3,75	0	5,63	7,03
I2 K=3,75	2	5,63	2,36
I2 K=3,75 4H	2	5,63	0,70
A0 K=3,50	0	5,12	3,28
A2 K=3,75	2	5,63	3,98
A2 K=3,75 4H	2	5,63	1,70

## 3. RESISTENZA ORMAIAMENTO



# Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi



## 3. MODULO COMPLESSO

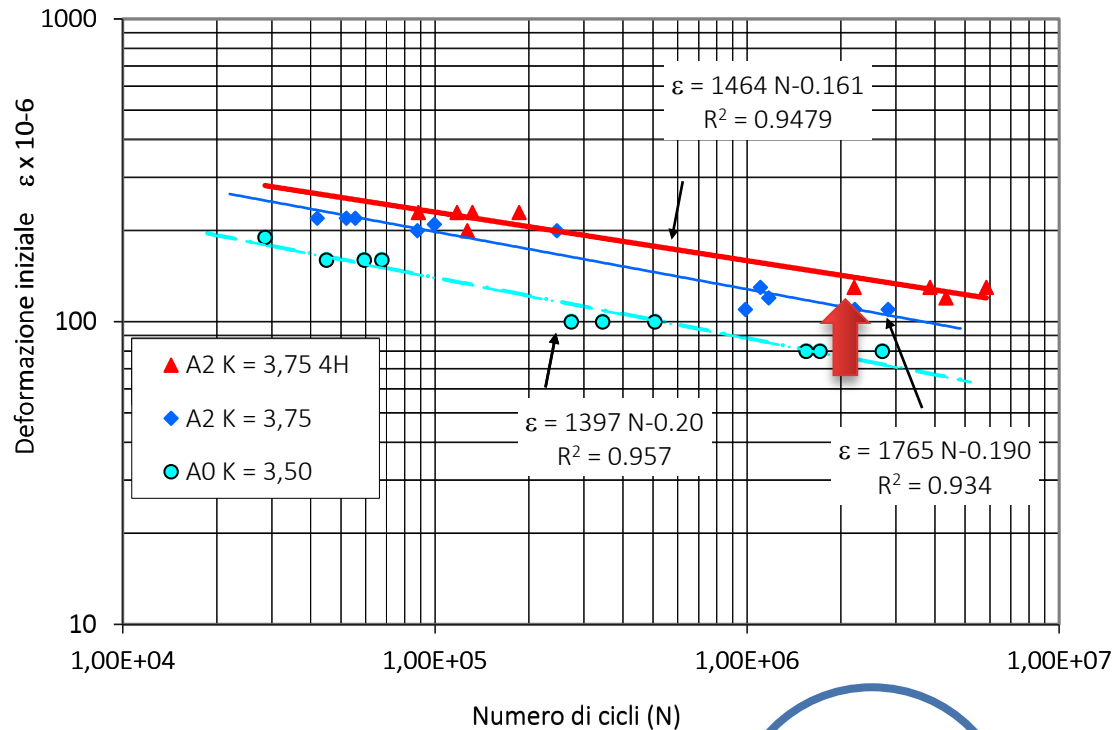
Minore  
rigidezza a  
basse  
temperature



Migliora  
resistenza  
alla  
fessurazione  
termica



# Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi

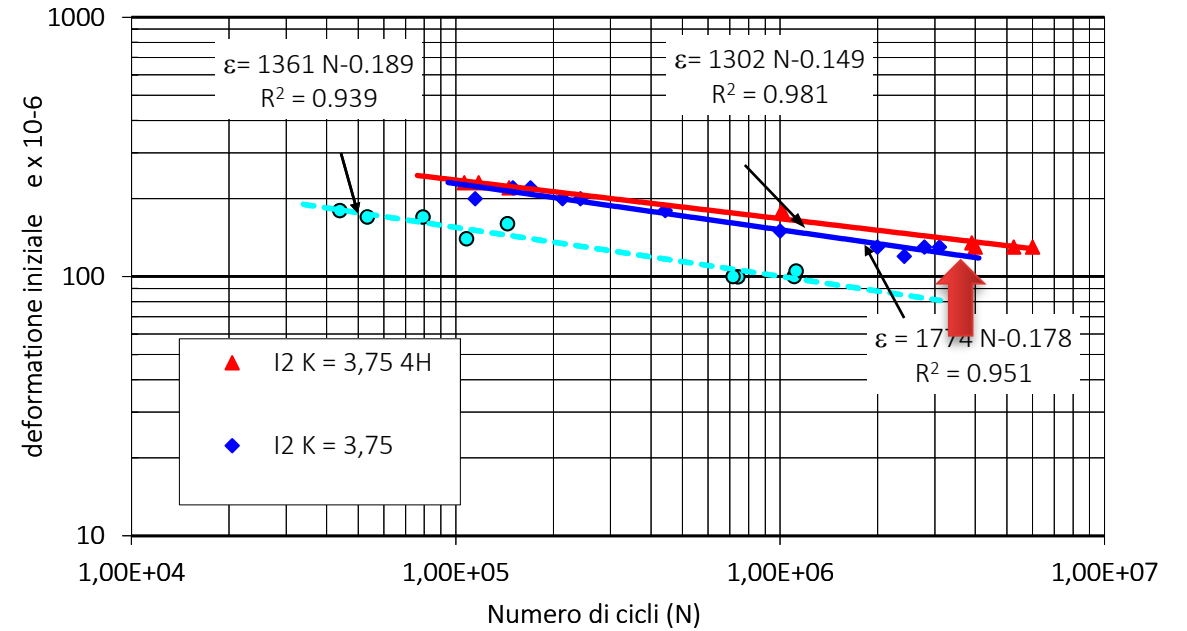


## 4. COMPORTAMENTO A FATICA

Aumento  
cicli a  
rottura per a  
fatica



Migliora  
resistenza  
alla  
fessurazione  
flessionale





1

2

# Impiego nelle pavimentazioni: WET & DRY

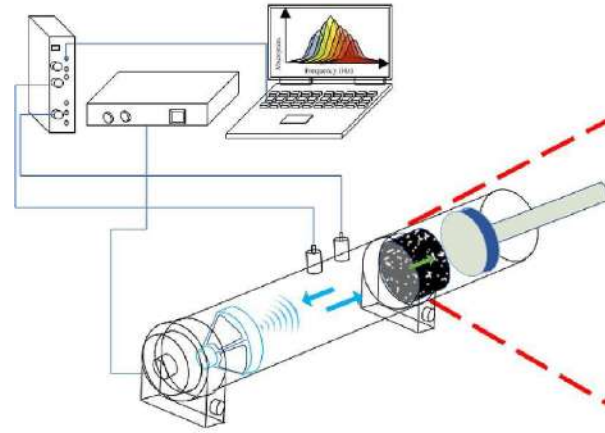
## MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI ACUSTICHE

1. attenuazione vibrazioni (natura elastica)
2. elevato tenore in vuoti tipico
3. aumentato assorbimento acustico

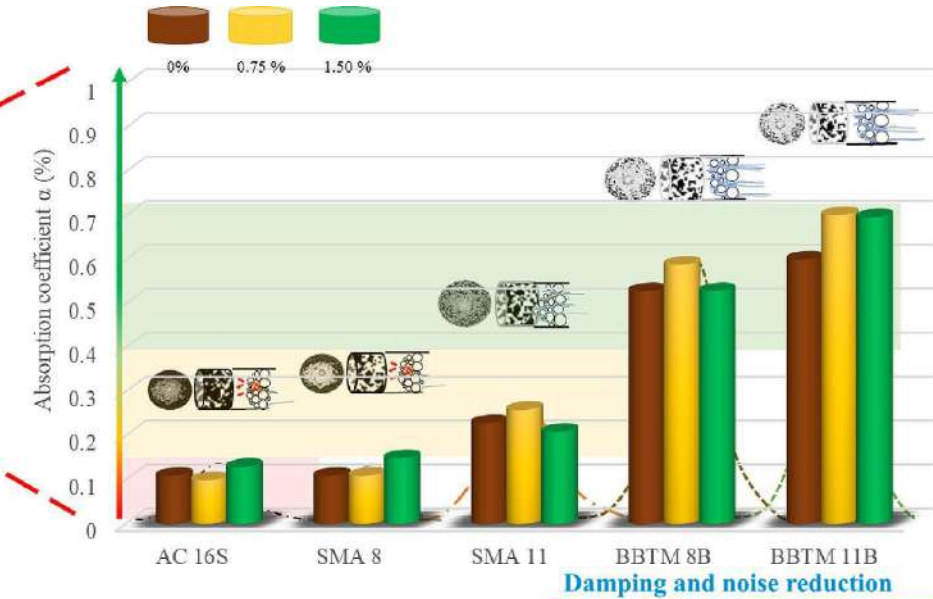
**IN SITO:** emissioni ridotte rispetto alle pavimentazioni convenzionali flessibili

Sito sperimentale* Firenze (700m)	ARAC (gap)	ARFC (open)	Reference
Leq,wd (dBA)	65.1	63.2	67.9
Leq,wn (dBA)	57.9	56.3	61.5

Sito sperimentale* Imola (1000m)	ARAC (gap)	Reference
Leq,wd (dBA)	66.5	72.7
Leq,wn (dBA)	60.4	66.4



IN LABORATORIO: Aumento del coefficiente di assorbimento acustico\*\*



Country	Noise level reduction
Belgio	8 - 10 dB
Francia	2 - 3 dB/3 - 5 dB
Germania	3 dB
Austria	3+ dB
Olanda	2.5 dB
Arizona	10 dB
California	3 - 7 dB



\* Canestrari, F., Pasquini, E., Santagata, F. A., & Antunes, I. (2009, November). Asphalt Rubber: policy disclosure in Italy. In *Asphalt Rubber 2009 Conference, Nanjing, China*.

\*\*Ling S, Yu F., Sun D., Sun G, and Xu L. "A comprehensive review of tire-pavement noise: Generation mechanism, measurement methods, and quiet asphalt pavement." *Journal of Cleaner Production* 287 (2021): 125056.

1

2

# Convenienza tecnica: WET & DRY

## PRESTAZIONI MECCANICHE

Aumento  
resistenza a fatica  
flessionale, N

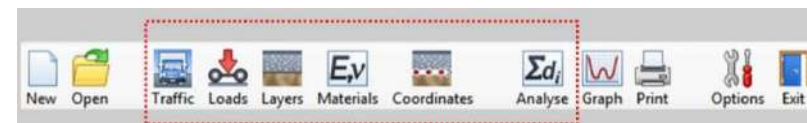
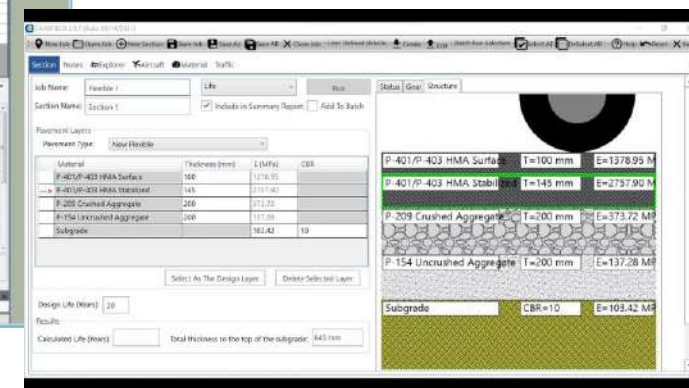
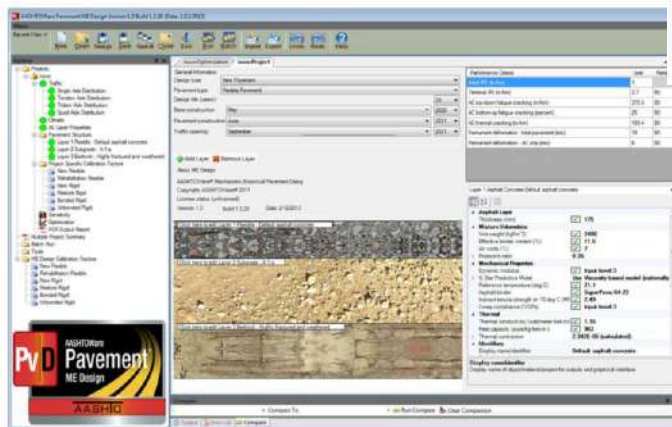
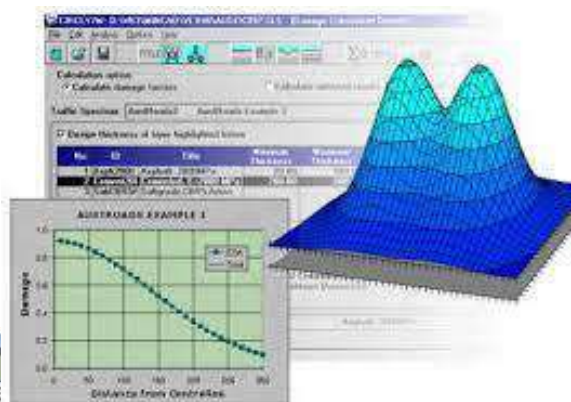
Aumento  
resistenza  
ormaiamento  $\epsilon$

Aumento  
resistenza fatica  
termica  $|E^*|$

Contrasto a  
risalita di fessure

A42 2007 15° 10 Hz

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT [µdéf]	SigmaT (MPa)	EpsZ [µdéf]	SigmaZ (MPa)
0.020	4000.0	0.350	0.000	25.9	0.225	40.7	0.658
collé			0.020	32.6	0.230	57.8	0.657
0.055	10000.0	0.350	0.020	32.6	0.571	-3.6	0.657
collé			0.075	4.2	0.332	27.5	0.550
0.090	9000.0	0.350	0.075	4.2	0.303	31.3	0.550
collé			0.165	-19.8	-0.158	34.2	0.227
0.100	9000.0	0.250	0.265	-19.8	-0.159	32.4	0.227
collé			0.265	-65.8	-0.705	39.2	0.041
infini	200.0	0.350	0.265	-65.8	0.004	183.5	0.041



Tipologia  
strutturale

Traffico

Clima

Caratteristiche  
materiali

Definizione  
spessori

Modello di  
pavimentazione  
e

Soluzione  
schemi di  
carico

$(\sigma, \epsilon)_{critiche}$

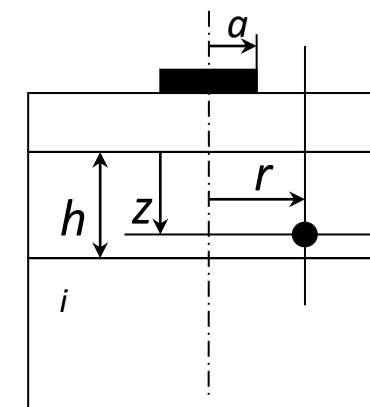
Verifiche

NO

SI

FINE

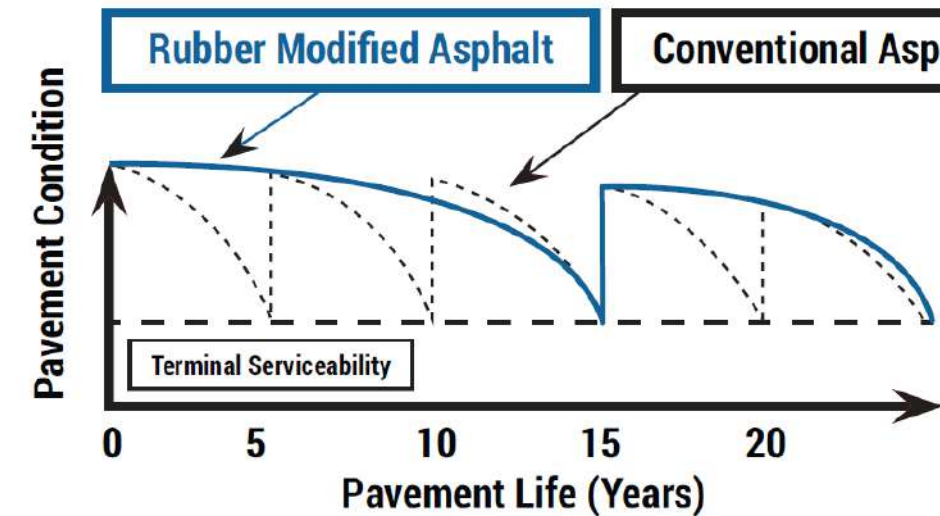
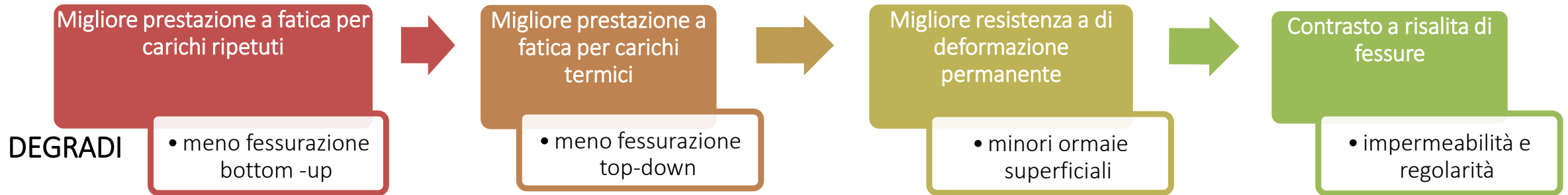
Aumento vita utile  
Riduzione spessori



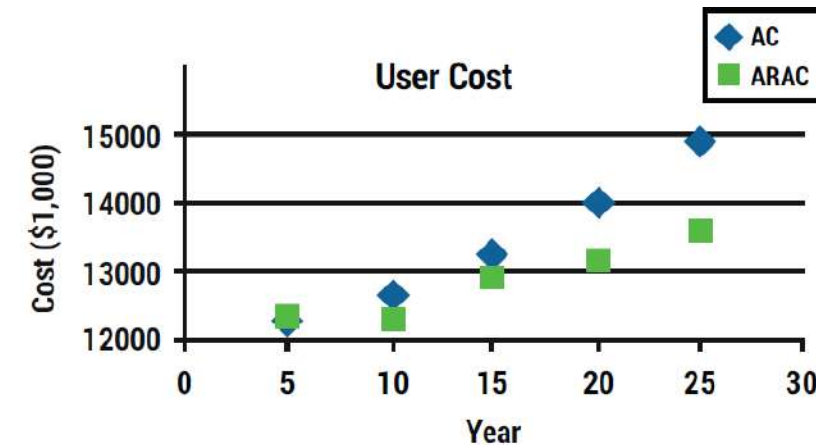
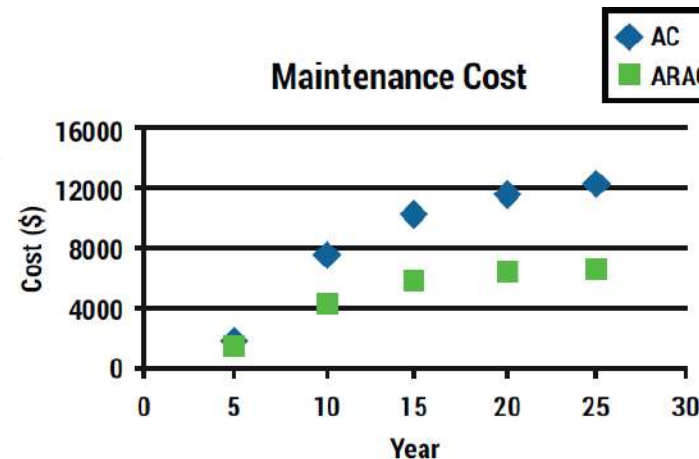
1

2

# Convenienza economica: WET & DRY



Riduzione costi manutenzione



1

2

# Convenienza tecnica\_economica: SINTESI WET & DRY

## BENEFICI

- **Miglioramento resistenza fessurazione termica**, all'invecchiamento e all'ossidazione, a fatica e a fessurazione di richiamo, per gli alti dosaggi  $AR_{WET}$
- **Miglioramento resistenza ormaimento**, per maggiore viscosità e più elevata  $T$  di rammollimento del legante;
- **Incremento della visibilità notturna**, per maggiore contrasto della pavimentazione;
- **Riduzione del rumore di rotolamento** e miglioramento della resistenza allo spogliamento, per spessore della pellicola di legante e tessitura delle miscele;
- **Attenuazione** dei fenomeni di **splash e di spray** in caso di pioggia, per la tessitura aperta delle miscele;
- **Riduzione costi di manutenzione**, per riduzione degli spessori in opera e più elevate prestazioni offerte dalle miscele

## PUNTI DI ATTENZIONE

- Ottimizzazione di **laboratorio fondamentale**
- **Aumento costi** unitari di **costruzione**



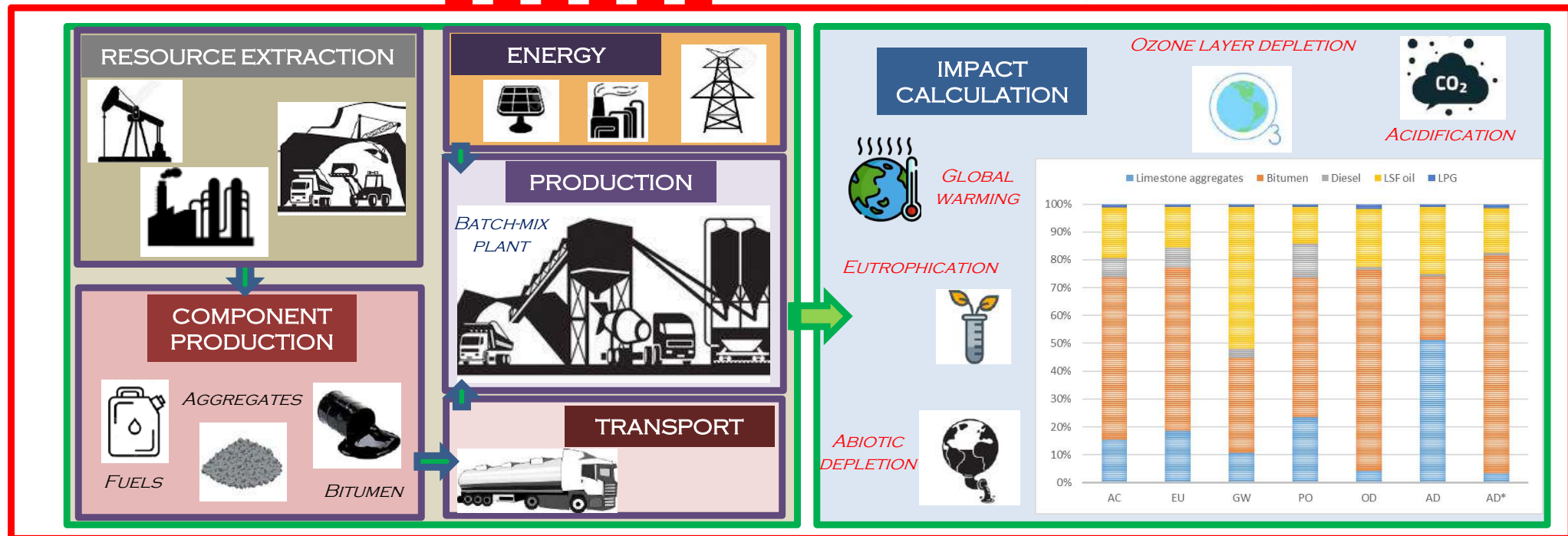
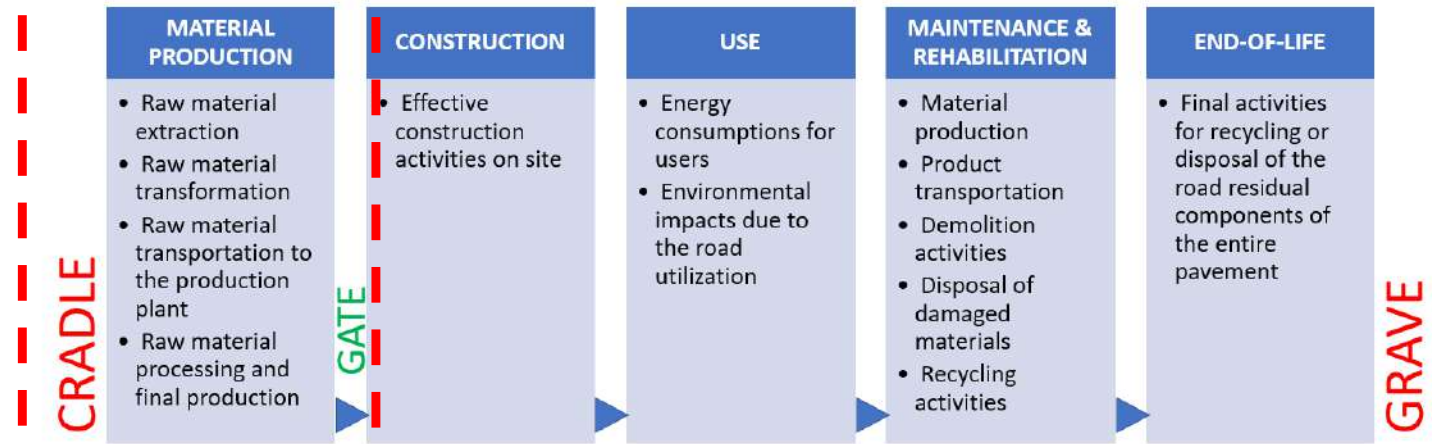
«Le prime vere applicazioni di pavimentazioni Asphalt Rubber in Italia sono state realizzate a Imola, Pistoia e Firenze nel 2007..»  
da <https://www.asphaltrubberitalia.com>

Applicazione sperimentale su strada urbana  
di scorrimento, USURA DRY 2%  
UNIPA - Comune di Palermo, 2003



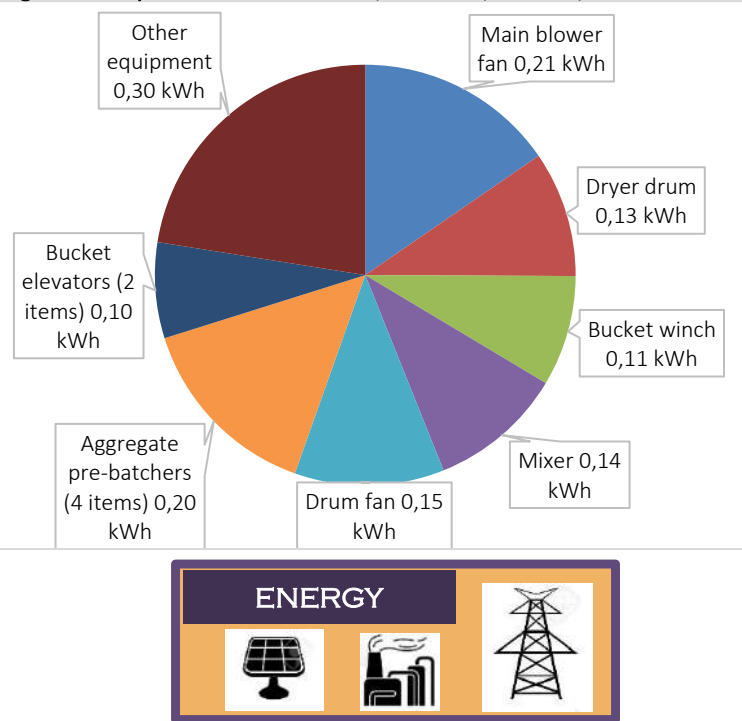
# Convenienza ambientale

## Life Cycle Analysis



# Convenienza ambientale

**Fig. Electricity demand** of the main plant components per DU



**Table . Fuel consumption** for production of a DU of asphalt mixture in the plant.

Fuel	Function	Consumption [kg]	Calorific value [MJ/kg]	Energy [MJ]
Diesel	Electric generating set	0.44	42.70	18.78
Diesel	Loader activity	0.19	42.70	8.04
LSF oil	Drum mixer heating	8.42	46.05	387.89
LPG	Bitumen heating	0.63	41.02	25.91

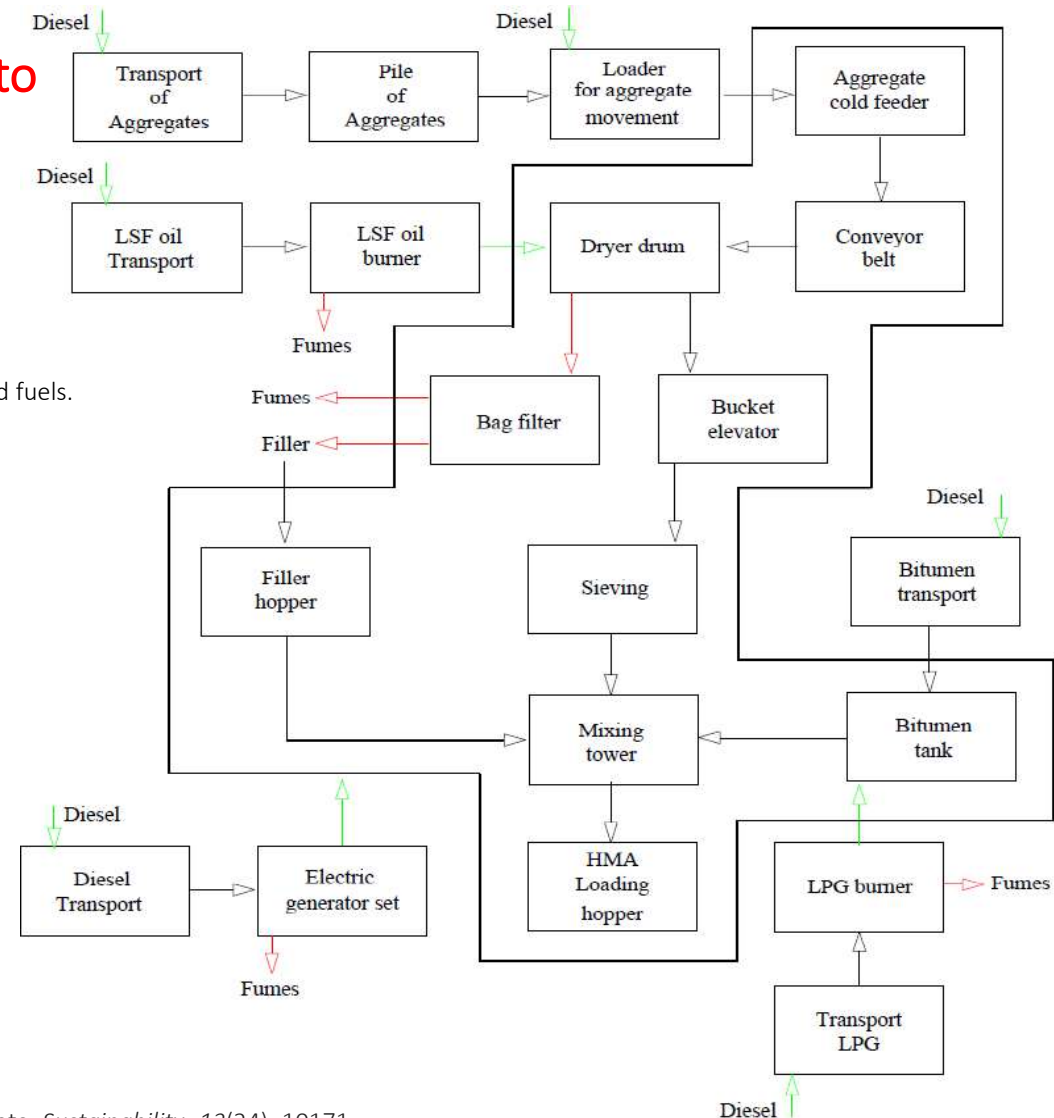
Attenzione: analisi da condursi sito per sito, su produzioni reali



**Table. Transportation distances** for mixture components and fuels.

Element	Distance [km]
Limestone aggregates	35.0
Bitumen plant #1	152.0
Bitumen plant #2	193.0
LSF oil	152.0
LPG	76.6
Diesel plant #1	47.8
Diesel plant #2	123.0

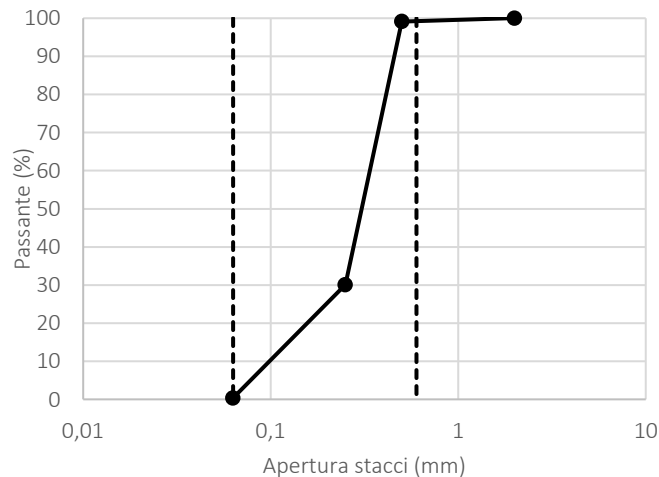
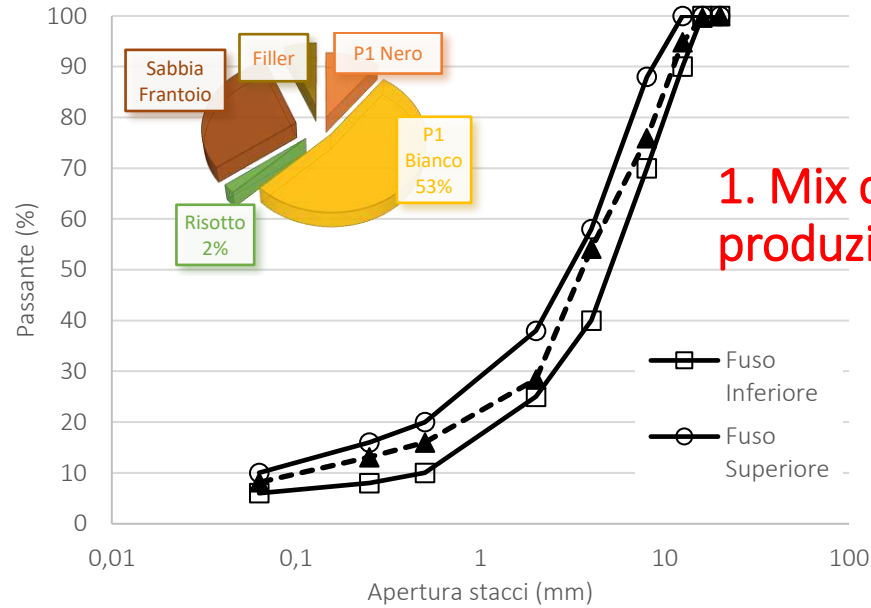
**Fig. Production processes** of a batch-mix asphalt production plant



# Convenienza ambientale

Metodo SuperPave con SGC (UNI EN 12697-31:2019)

## Usura A (Cap. Anas)



CRM 1% DRY  
(10kg/tonn)

Caratteristiche	U.m.	Valore
Densità a 25°C ( $\gamma$ )	g/cm <sup>3</sup>	1,182

Miscele	% b	vuoti [%]		
		N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>
Requisiti Cap. Anas	-	11-15	3-6	≥ 2
Usura A	4,5	16,9	6,7	4,8
Usura A	5	16,4	5,8	4,1
Usura A	5,5	14,5	4,4	2,8
Usura A	6	15,6	5,8	4,1
Usura A CRM	5	13,7	4,4	2,9
Usura A CRM	5,5	13,9	4,7	3,1
Usura A CRM	5,75	13,3	4,1	2,7
Usura A CRM	6,1	12,8	3,8	2,3

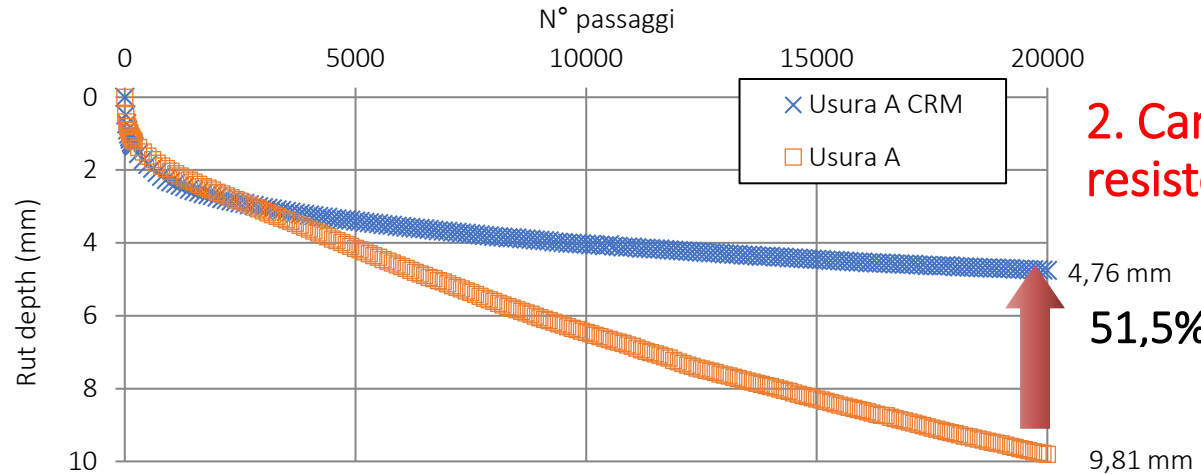
Requisiti Cap. Anas	bitume T.Q.	bitume Mod.
R <sub>t,medio</sub> (GPa*10 <sup>-3</sup> )	0,72-1,60	0,95-1,90
CTI <sub>medio</sub> (GPa*10 <sup>-3</sup> )	≥ 65	≥ 75

## Prova ITS (UNI EN 12697-23:2018)

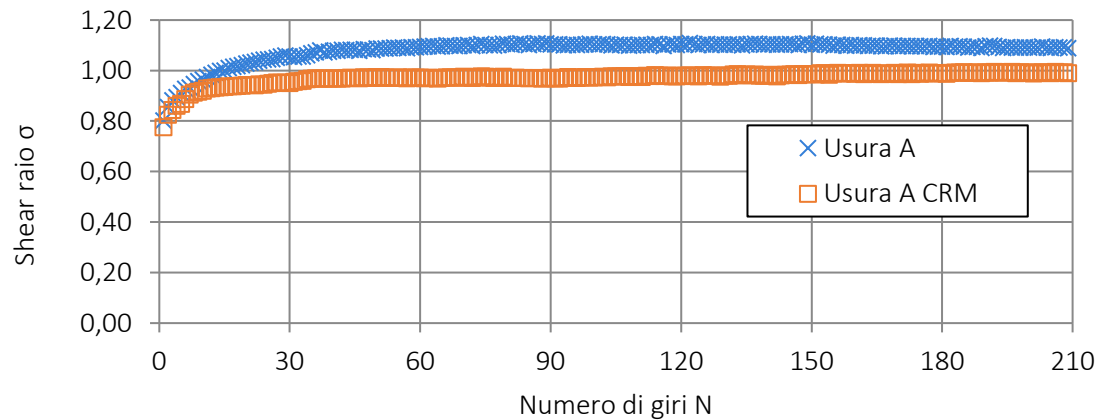
Miscele	% b	R <sub>t,medio</sub> (GPa*10 <sup>-3</sup> )	CTI <sub>medio</sub> (GPa*10 <sup>-3</sup> )
Usura A	4,5	2,21	178
Usura A	5,0	1,61	99
Usura A	5,5	1,62	79
Usura A	6,0	1,33	67
Usura A CRM	5	1,60	119
Usura A CRM	5,5	1,59	102
Usura A CRM	5,75	1,53	92
Usura A CRM	6,1	1,29	65

# Convenienza ambientale

## Resistenza all'ormaiamento



## 2. Caratterizzazione resistenze meccaniche



## 3. Caratterizzazione prestazioni funzionali

### Caratteristiche superficiali

Nome	Tipo additivo	HS [mm]	BPN
Usura A @ 5,5%b		0.913	72
Usura A CRM @ 5%b	CRM	1.101	70





# Convenienza ambientale

## 4. Analisi degli impatti

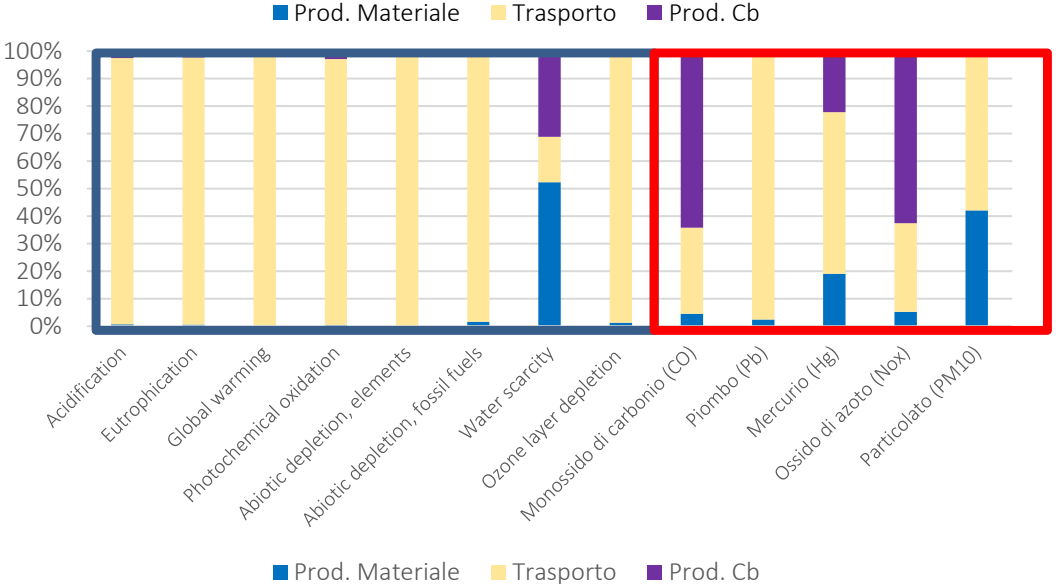
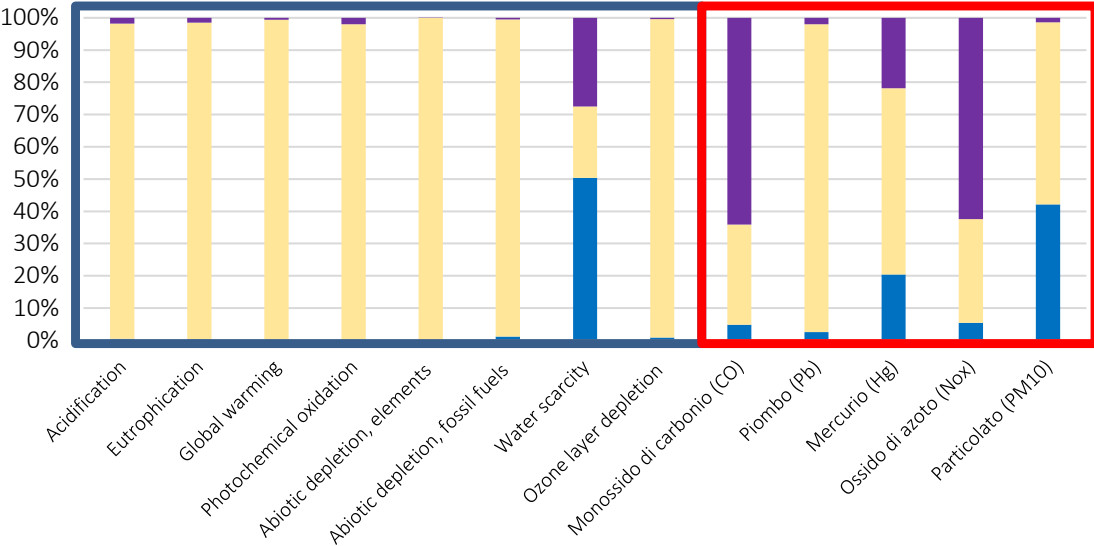
Categorie di impatto	Unità	Prodוז. materia prima	Trasporto	Prodוז. conglom. bituminoso	Totale
Acidification	kg SO2 eq	0,32	67,72	1,22	69,26
Eutrophication	kg PO4 eq	0,05	13,49	0,21	13,76
Global Warming	kg CO2 eq	26,31	14841,36	92,15	14959,82
Photochemical oxidation	kg NMVOC	0,23	81,64	1,68	83,55
AD, elements	kg Sb eq	2,51E-05	0,41	1,86E-05	0,41
AD, fossil fuels	MJ	2684,75	223009,40	1258,67	226952,82
Water scarcity	m3 eq	1465,95	643,23	798,50	2907,68
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	2,46E-05	2,74E-03	1,15E-05	2,77E-03
Monossido di carbonio (CO)	g	0,06	0,36	0,74	1,15
Piombo(Pb)	mg	8,36E-06	3,06E-04	6,32E-06	3,21E-04
Mercurio (Hg)	μg	1,14E-06	3,23E-06	1,22E-06	5,59E-06
Ossido di azoto (Nox)	g	0,13	0,77	1,50	2,41
Particolato	g	0,05	0,07	1,71E-03	0,12

Usura A

↓ riduzione

Categorie di impatto	Unità	Prodוז. materia prima	Trasporto	Prodוז. conglom. bituminoso	Totale
Acidification	kg SO2 eq	0,29	44,56	1,22	46,07
Eutrophication	kg PO4 eq	0,05	8,88	0,21	9,14
Global warming	kg CO2 eq	24,14	11766,51	91,71	11882,36
Photochemical oxidation	kg NMVOC	0,22	53,72	1,67	55,61
AD, elements	kg Sb eq	2,47E-05	0,27	1,85E-05	0,27
AD, fossil fuels	MJ	2443,38	146753,62	1252,70	150449,71
Water scarcity	m3 eq	1332,72	423,28	794,71	2550,72
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	2,24E-05	1,80E-03	1,14E-05	1,84E-03
Monossido di carbonio (CO)	g	0,05	0,36	0,73	1,14
Piombo (Pb)	mg	7,74E-06	3,04E-04	6,29E-06	3,19E-04
Mercurio (Hg)	μg	1,04E-06	3,21E-06	1,21E-06	5,47E-06
Ossido di azoto (NOx)	g	0,12	0,77	1,49	2,39
Particolato (PM10)	g	0,05	0,07	1,70E-03	0,12

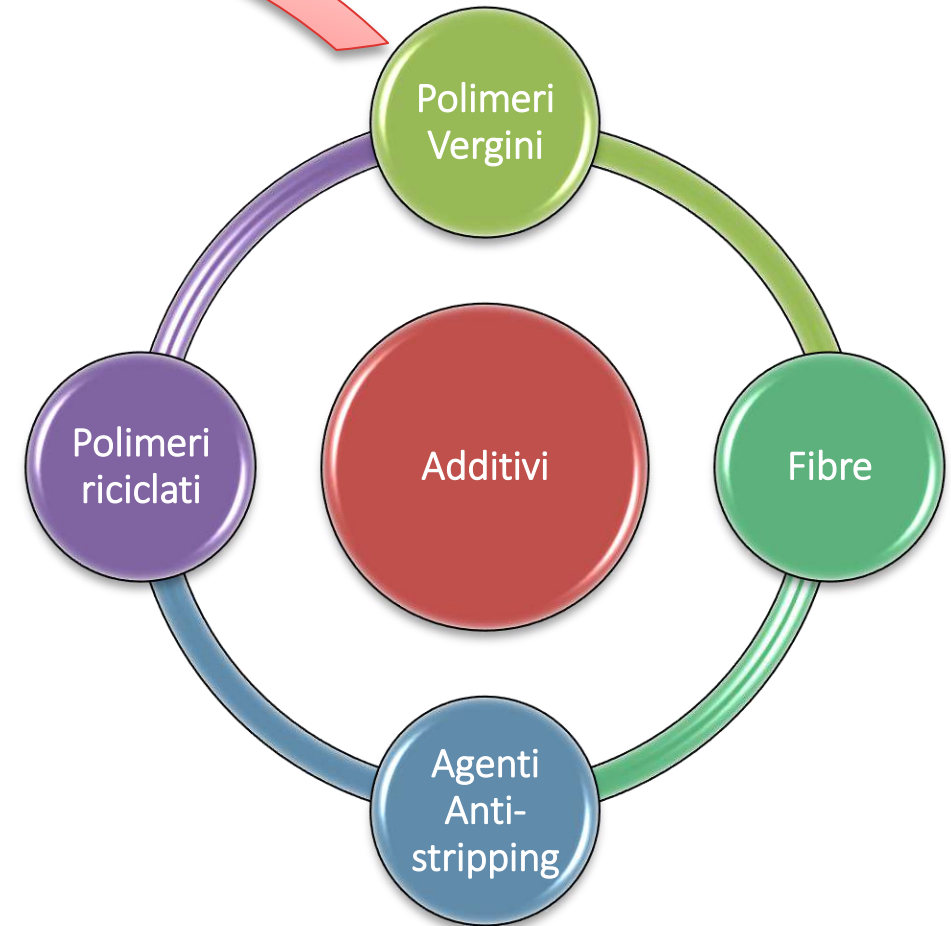
Usura A CRM



# Altre materie polimeriche

## POLIMERI VERGINI

Tipo	Es.	Vantaggi	Svantaggi
Plastomeri	• PE	• Buone proprietà alle alte T	• Limitato incremento di elasticità
	• PP	• Costi relativamente bassi	• Problemi di separazione delle fasi
	• EVA	• Stabilità allo stoccaggio	• Limitato incremento del recupero elastico
	• EBA	• Resistenza ormaiamento	• Limitato aumento delle proprietà alle basse T
Elastomeri	• SBS	• Aumento della rigidezza	• Problemi di compatibilità con alcuni bitumi
	• SIS	• Riduzione suscettività termica • Migliore risposta elastica	• Scarsa resistenza a ossidazione e UV • Costi relativamente elevati
	• SEBS	• Scarsa resistenza a ossidazione e UV	• Problemi di stabilità allo stoccaggio • Riduzione di elasticità • Costi elevati



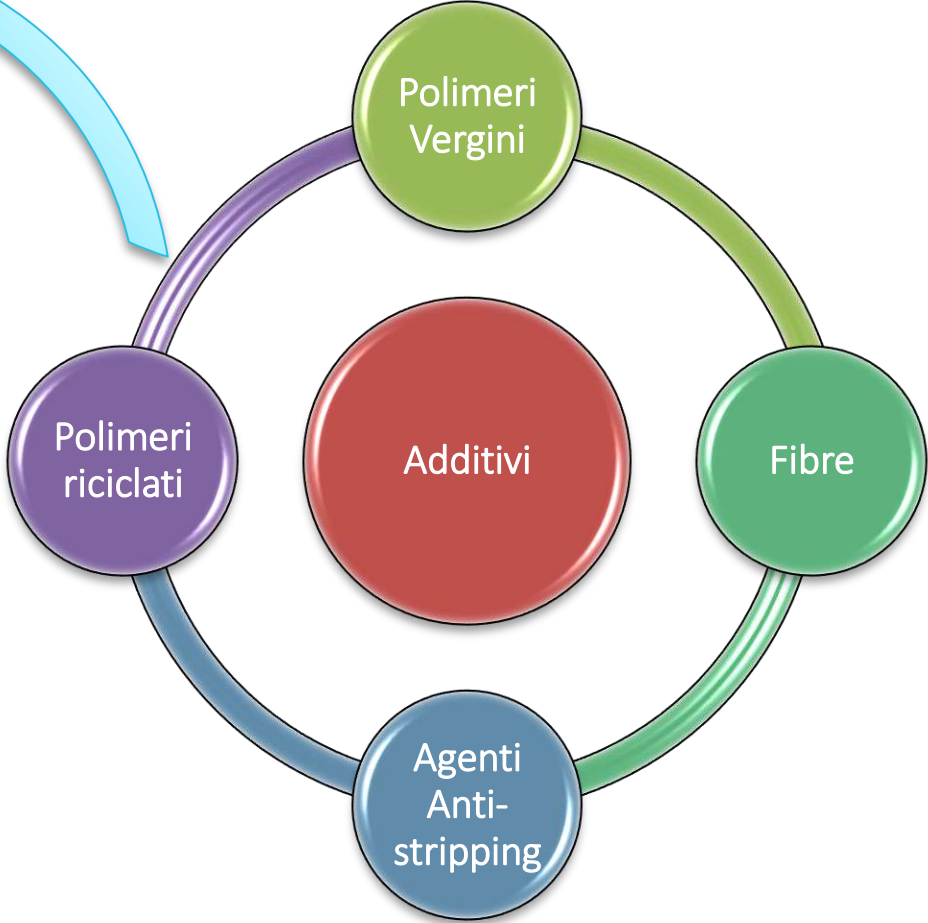
<sup>1</sup> Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54, 18-38.

<sup>2</sup> Nizamuddin, S., Boom, Y. J., & Giustozzi, F. (2021). Sustainable polymers from recycled waste plastics and their virgin counterparts as bitumen modifiers: A comprehensive review. *Polymers*, 13(19), 3242.

# Altre materie polimeriche da riciclo

## POLIMERI RICICLATI

Tipo	Vantaggi	Svantaggi
<ul style="list-style-type: none"><li>Gomma triturata da PFU<sup>1</sup></li></ul> 	<ul style="list-style-type: none"><li>Incremento di <b>elasticità</b></li><li><b>Resistenza ormaimento</b></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Problemi Stabilità stoccaggio WET</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>Plastiche da RSU (PLASMIX)<sup>2</sup></li></ul>  	<ul style="list-style-type: none"><li>Incremento rigidezza</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Problemi Stabilità allo stoccaggio</li><li>Limitato incremento di elasticità</li><li><b>Elevata eterogeneità</b></li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>Scarti di riciclo di teli di serra<sup>3</sup></li></ul> 	<ul style="list-style-type: none"><li><b>Resistenza ormaimento</b></li><li>Incremento rigidezza</li><li>Riduzione suscettività termica</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Problemi di <b>separazione</b> delle fasi</li><li>Problemi di <b>compatibilità</b></li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>Reti da pesca dismesse</li></ul>	In relazione al polimero di base	



<sup>1</sup>Celauro, C., & Di Francisca, A. (2003). Impiego del granulato di gomma da pneumatici usati in tecnica stradale. *Strade & Autostrade*, (5), 10-20.

<sup>2</sup>Celauro, C., Teresi, R., Graziano, F., La Mantia, F. P., & Protopapa, A. (2021). Preliminary evaluation of Plasmix compound from plastics packaging waste for reuse in bituminous pavements. *Sustainability*, 13(4), 2258.

<sup>3</sup>Celauro, B., Tesoriere, G., & Celauro, C. (2006). Proprietà strutturali di conglomerati bituminosi migliorati con plastiche post-uso. In *XVI Convegno Nazionale SIIV-Atti del Congresso* (Vol. 1, pp. 351-365).

# CONCLUSIONI

L'uso di Pneumatici Fuori Uso nelle costruzioni stradali consente

- ✓ Recupero di materiale destinato in discarica
- ✓ Prestazioni meccaniche migliori in termini di resistenza a fatica (termica e flessionale) e all'accumulo di deformazione permanente
- ✓ Incremento vita di servizio pavimentazioni
- ✓ Riduzione rumore
- ✓ Minore impatto ambientale
- ✓ Ridotta manutenzione e costi di gestione



FONDAMENTALE RUOLO DEGLI STUDI  
DI FORMULAZIONE DI LABORATORIO







CONVEGNI IN MODALITÀ ON LINE  
MODULO 2 - Venerdì 23 febbraio 2024, ore 15.00 - 18.00  
**Materiali e Tecnologie  
per Pavimentazioni Stradali Sostenibili**

**GRAZIE**



Società Italiana Infrastrutture Viarie



**Clara Celauro**

Professore SSD Strade, Ferrovie, Aeroporti  
Proretrice all'Edilizia d'Ateneo

Dipartimento di Ingegneria - UNIPA  
[clara.celauro@unipa.it](mailto:clara.celauro@unipa.it)



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



Ministero  
dell'Università  
e della Ricerca

