



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO



CONSIGLIO NAZIONALE DEGLI INGEGNERI



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**

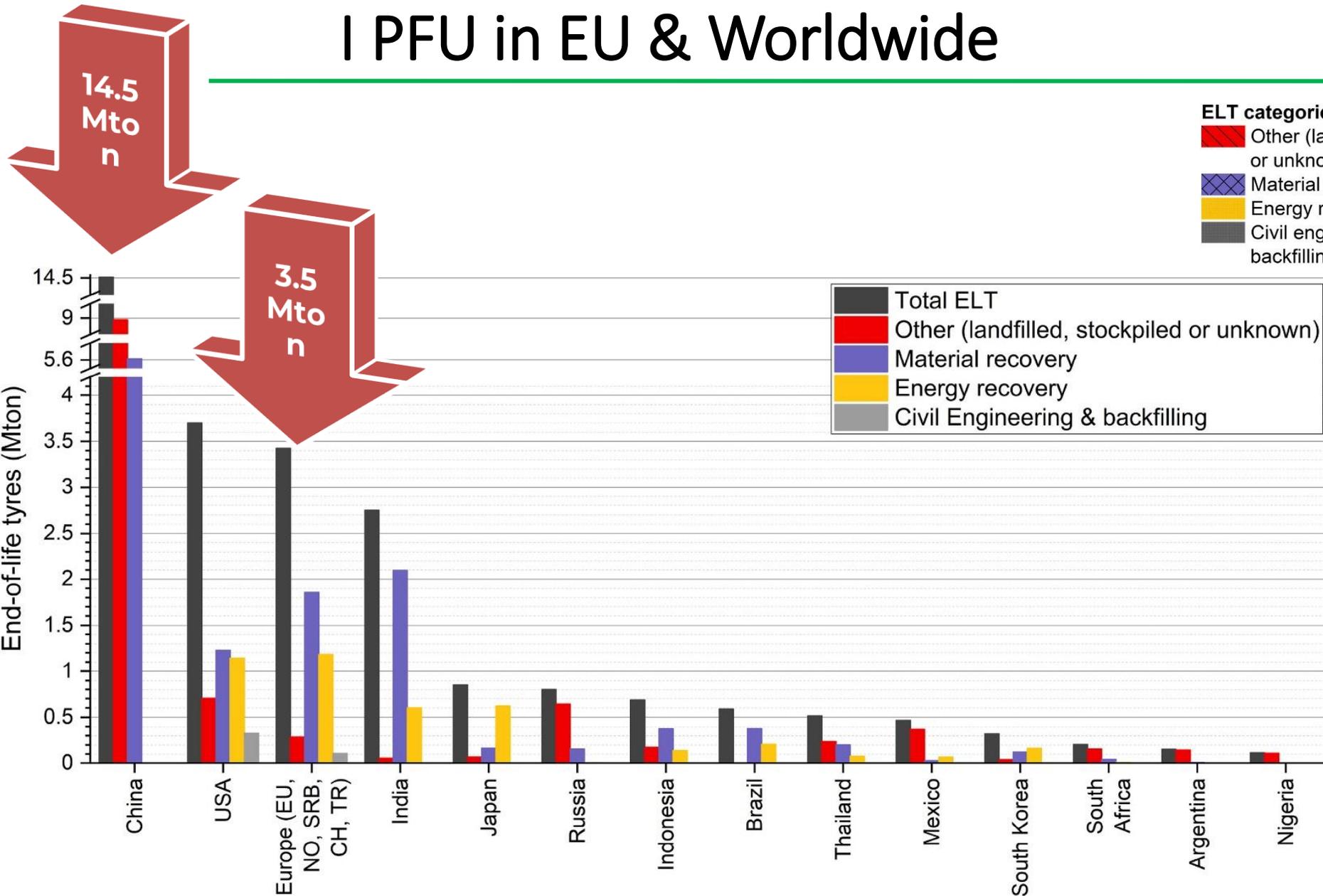
Prof. Ing. Clara Celauro
clara.celauro@unipa.it

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**

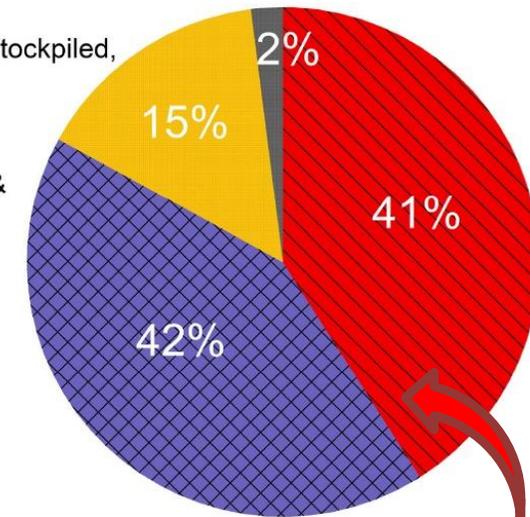


I PFU in EU & Worldwide



ELT categories:

- Other (landfilled, stockpiled, or unknown)
- Material recovery
- Energy recovery
- Civil engineering & backfilling



**Enorme
potenzialità
di mercato**

Reference year: 2019 (Argentina, Europe, China), 2018 (USA, India, Japan, Russia, Indonesia, Mexico, South Korea, Nigeria), 2017 (Brazil), 2016 (South Africa), 2013 (Thailand)

I PFU in EU & Worldwide

Annex: End of Life Tyres Management – Europe – 2019



National figures
(tonnes)

| | ELT Arising (A) | ELT recovery | | | Unknown/Stocks (F) | ELT treated (H)=(G)/(A) | |
|----------------------------|------------------|---|------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|
| | | Material | | Energy | | | |
| | | Civil engineering, public works & backfilling (B) | Recycling* (C) | Total Material recovery (D)=(B+C) | | | Energy 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 | 52.001 | | 51.575 | 51.575 | 1.026 | 100% | |
| Italy | 384.000 | 842 | 170.000 | 170.842 | 170.000 | 32.000 | 89% |
| Latvia | 12.500 | | 8.000 | 8.000 | 3.500 | 1.000 | 92% |
| Lithuania | 21.533 | | 14.413 | 14.413 | 3.752 | 2.426 | 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 | 57.500 | 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 | 363 | 85% |
| Slovenia | 27.307 | | 7.496 | 7.496 | 13.150 | 1.258 | 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 | 15.669 | 97% |
| EU27+UK | 3.164.282 | 112.507 | 1.652.219 | 1.764.725 | 1.254.796 | 136.279 | 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 | 28.881 | 87% |
| EU27+NO+CH+RS+TR+UK | 3.555.611 | 112.954 | 1.841.201 | 1.954.154 | 1.428.815 | 165.160 | 95% |
| 2018 | 3.573.900 | 96.120 | 1.920.100 | 2.016.220 | 1.248.880 | 318.800 | 91% |
| 2018 vs 2019 | -1% | 18% | -4% | -3% | 14% | -48% | 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

LEGGE 16 luglio 2020, n. 76
Isure urgenti per la semplificazione e l'innovazione digitale

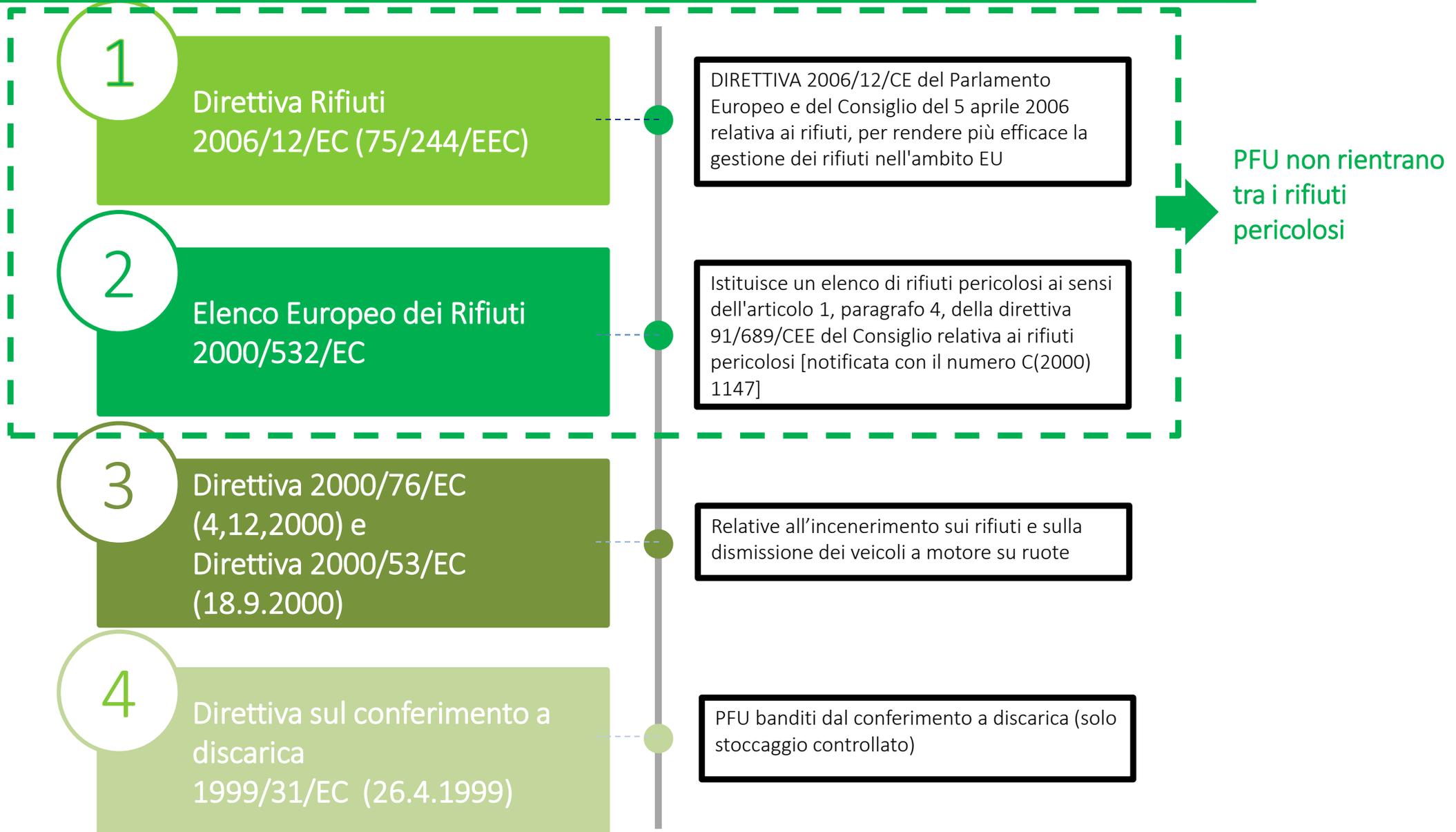


Stoccaggio PFU in centri autorizzati soltanto e inviati a siti di lavorazione del rifiuto



Certificazione del sottoprodotto (GL apposto in UNI). Ecopneus

Riferimenti Normativi in EU



Composizione tipica degli pneumatici

PRODOTTI RECUPERABILI

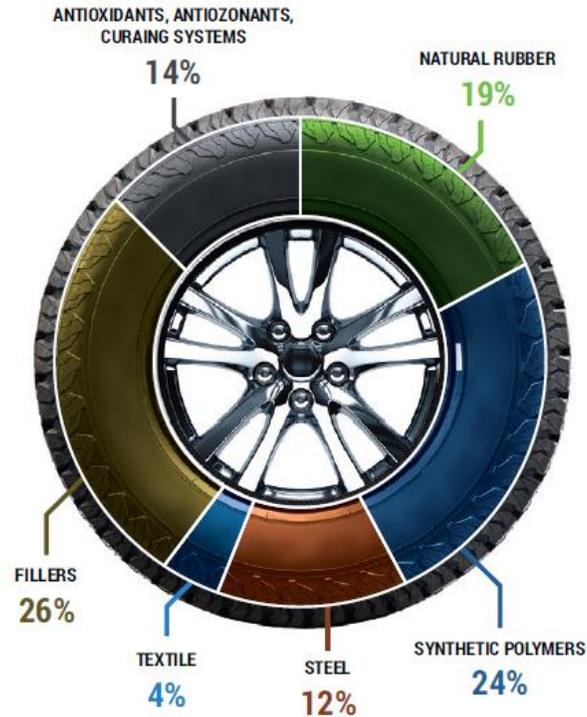
Granulati vari

Acciaio

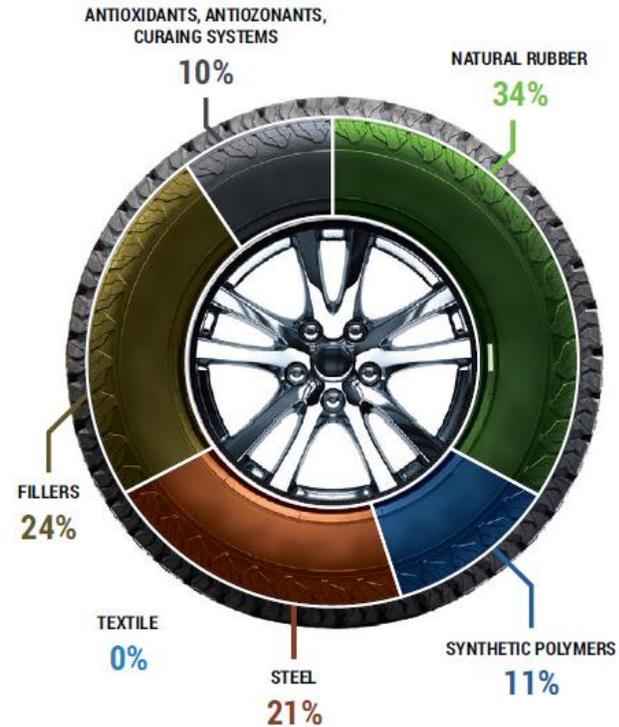
fibre di nylon

fibre tessili

Passenger/Light Truck Tires



Truck Tires



FASI TRATTAMENTO

- Triturazione
- Vagliatura
- Deferrizzazione
- Granulazione
- Polverizzazione



Rubber chips



Rubber crumbs



Rubber powder



Steel wire



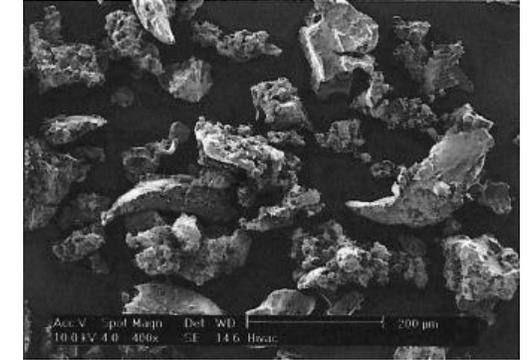
Nylon wire

Il recupero dei PFU

Principali processi di granulazione

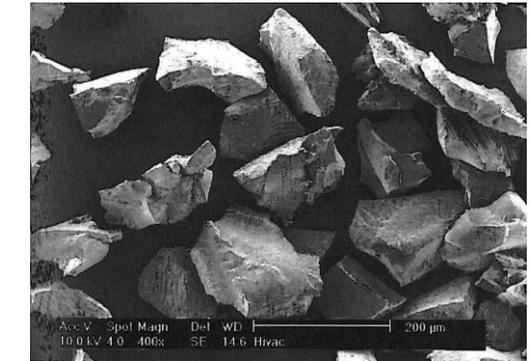
Triturazione meccanica

- 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

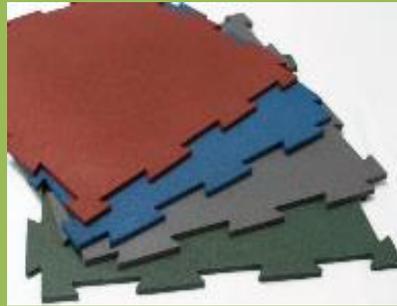
- **Macinazione** a T inferiore a quella di fragilizzazione della gomma.
- **Raffreddamento** solitamente **mediante** azoto liquido.
- **Granulato** ottenuto a **superfici praticamente lisce**.



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:

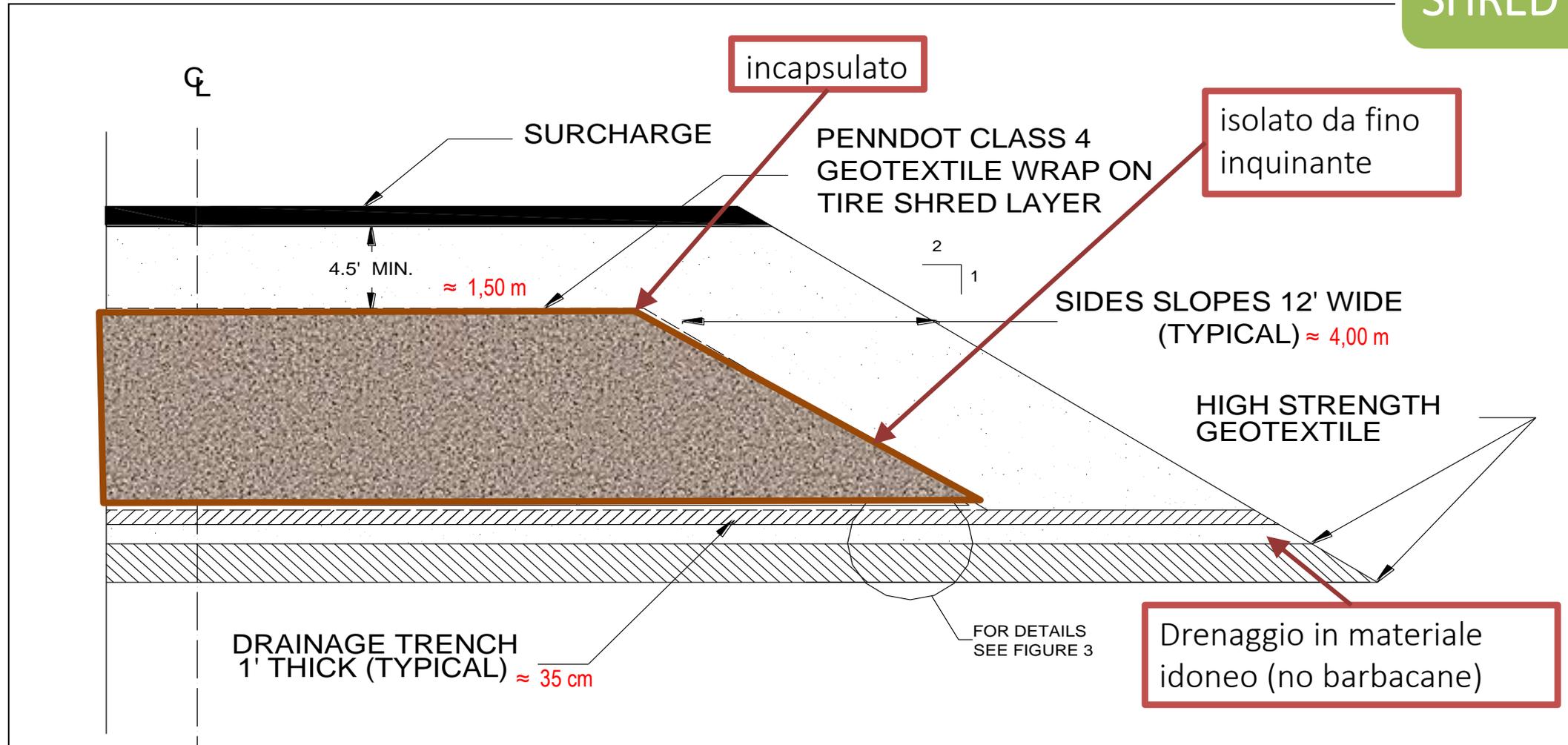
- **Pesi per unità di volume** compattata dei ($\sim 800 \text{ kg/m}^3$) **notevolmente inferiori** di quelli delle terre naturali in opera ($\sim 1900 \text{ kg/m}^3$);
- **elevata conduttività idraulica** ($1 \div 10 \text{ cm/s}$) e **bassi valori di spinta**
- **costo pari al 50%** di quello di convenzionali materiali alleggeriti [scisti espansi, geofam 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

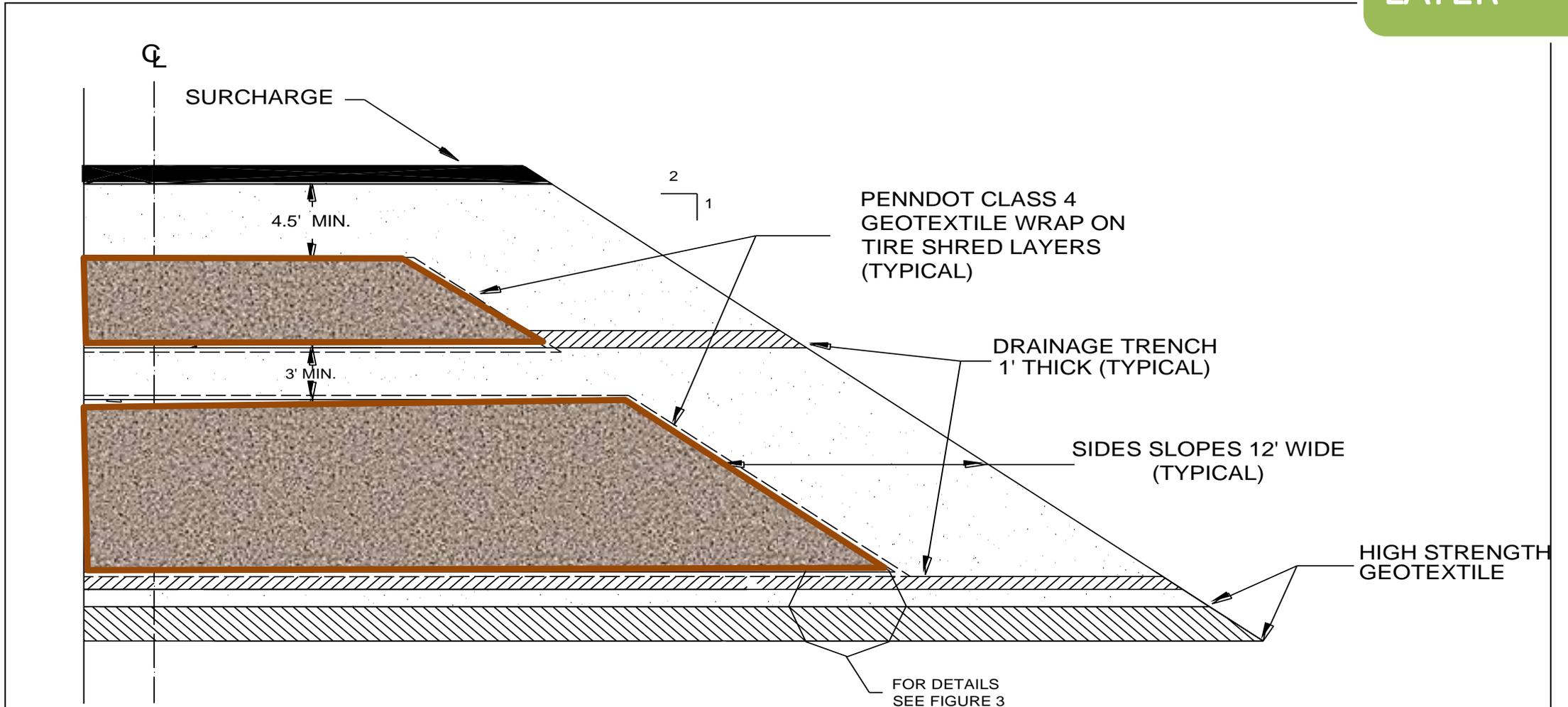


Impiego nelle costruzioni stradali: corpo stradale

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 (ϕ') - 27° (toe failure)
- angolo di attrito interno (ϕ') - 25° (deep seated)
- Coesione (c') - $70 \text{ lb/ft}^2 \sim 0,034 \text{ kg/cm}^2$ (toe failure)
- Coesione (c') - 0 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)

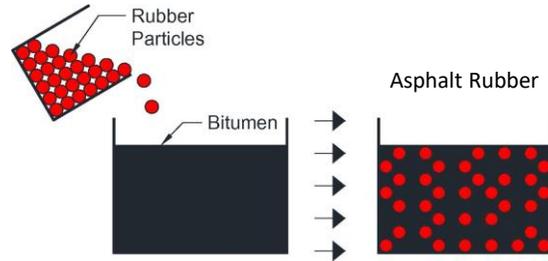
1991

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).

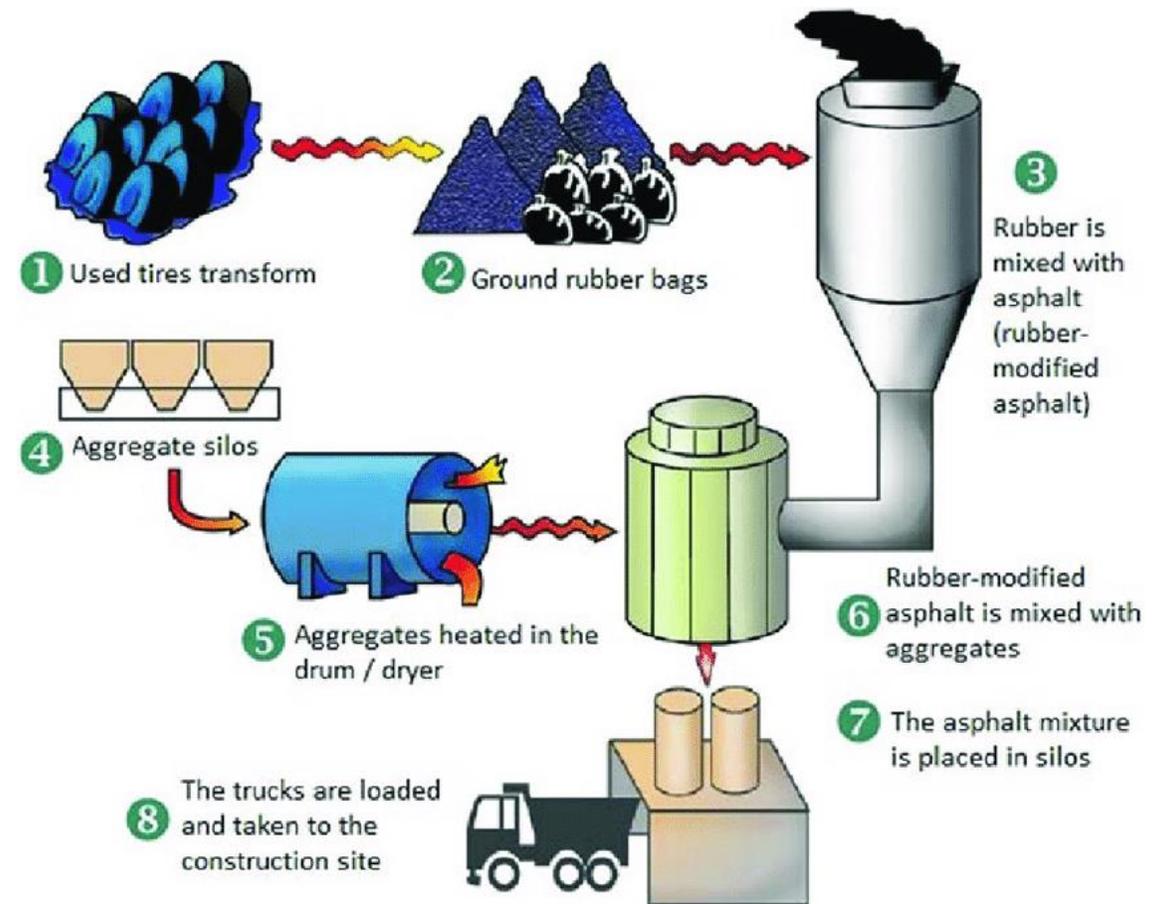
Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi



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 |

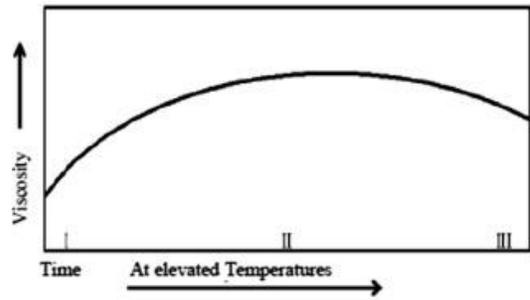
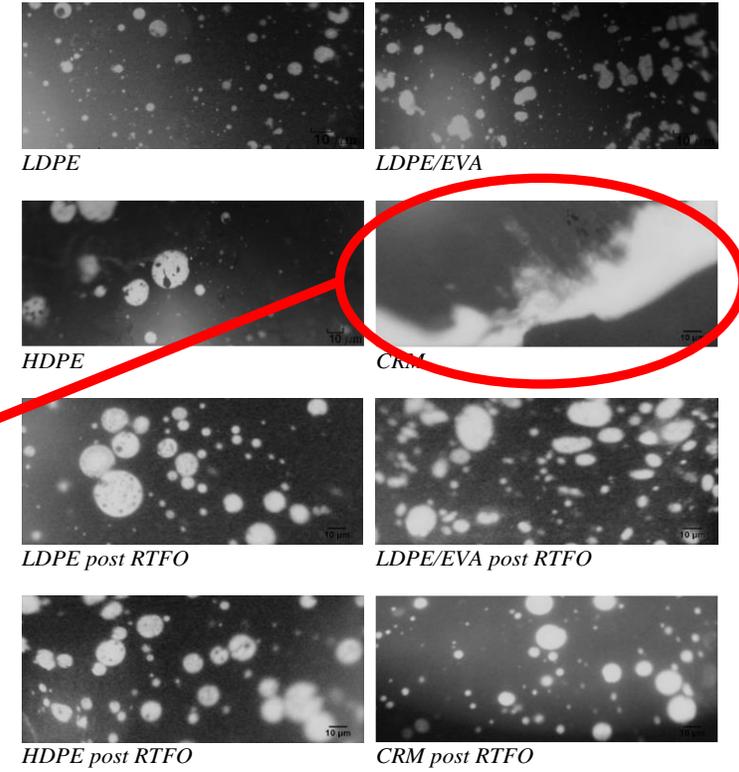
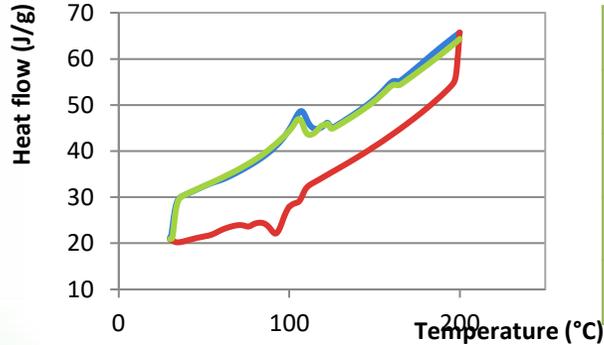


Processo Terminal blend: evoluzione del WET. L'Asphalt Rubber è prodotto e posto in stoccaggio in impianto e trasportato ai siti di lavoro solo quando ne è richiesta la fornitura. L'impianto necessita di **apposita unità di miscelazione ad alto taglio** e di **sili di stoccaggio del bitume con agitazione**,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

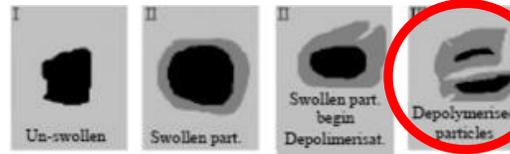
Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi

CONDIZIONI DI PROCESSO TIPICHE

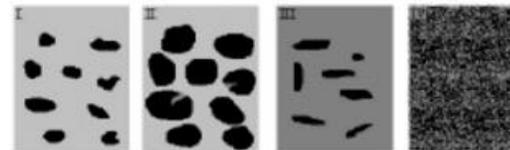
| | |
|----------------------|-------------------------|
| Temperature | Circa 190° C |
| tempi | > 1h |
| V | 3000 rpm |
| Dosaggi | > 15% peso di aggregato |
| Dosaggi per tonn mix | 19 kg |



(a) Binder viscosity



(c) Particles size



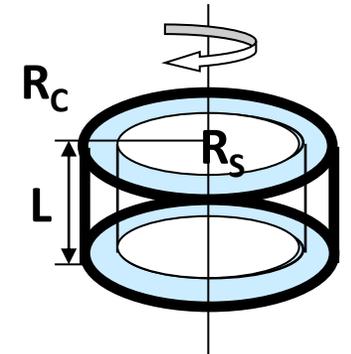
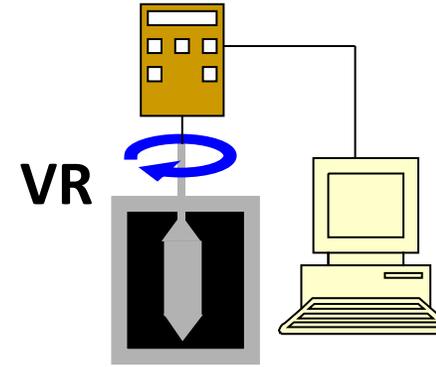
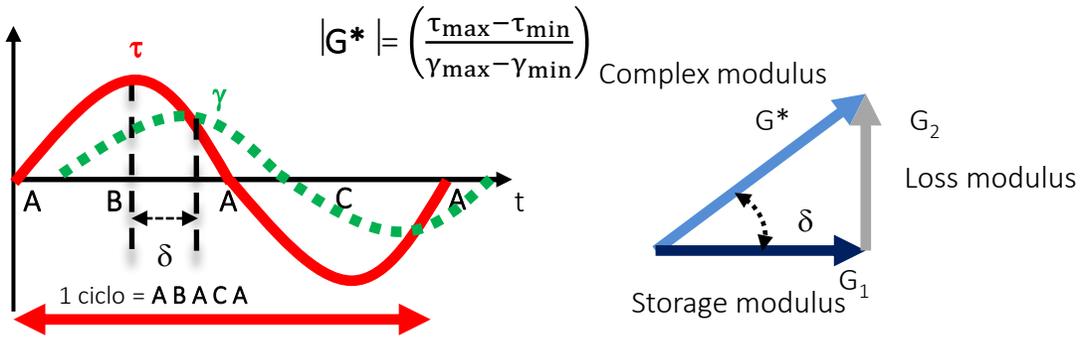
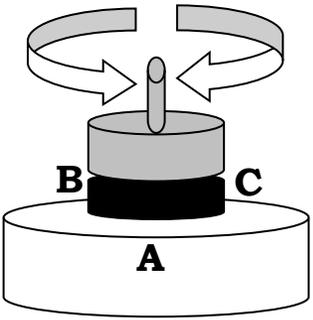
(b) Binder matrix

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

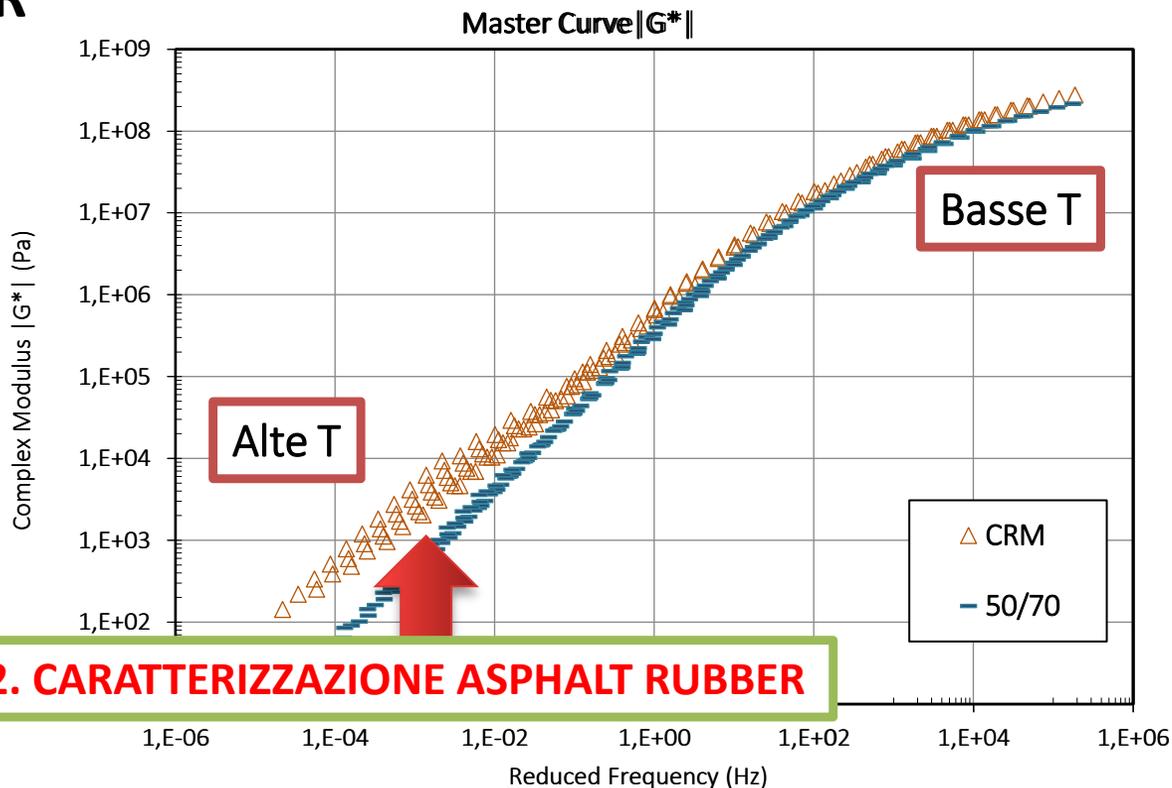
| Requirement characteristics | Pen 25°C | T _{R&B} | Pen 25°C | T _{R&B} | Δ T _{R&B} | R _{PEN} |
|-----------------------------|----------|----------------------|-----------|----------------------|------------------------|------------------|
| | Pre-RTFO | | Post-RTFO | | | |
| Standard BITUMEN 50/70 | EN 1426 | EN 1427 | EN 1426 | EN 1427 | EN 12607-1 | EN 12607-1 |
| LDPE | 68 | 50 | 44 | 54 | 4 | 64.71 |
| HDPE | 35.7 | 56 | 23 | 62.25 | 6.25 | 64.43 |
| LDPE-EVA | 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 |

1. CARATTERIZZAZIONE COMPONENTI

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 % |

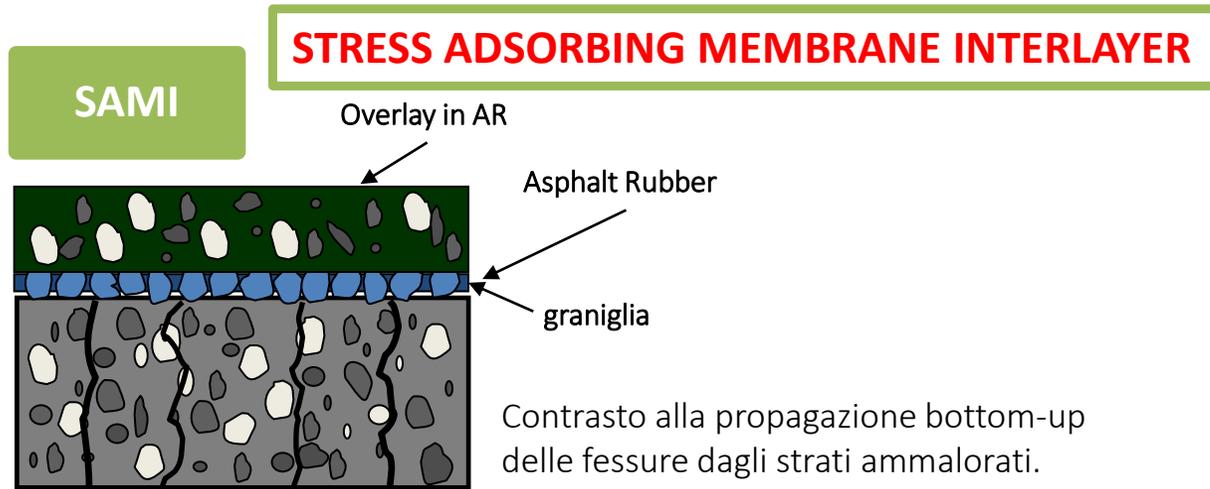
Aumento rigidità alle alte T

=

Migliora resistenza all'accumulo di ormaie



Impiego nelle pavimentazioni: manutenzione esistenti



Preparazione superficie (spazzatrice)



Spandimento legante



Spandimento graniglia

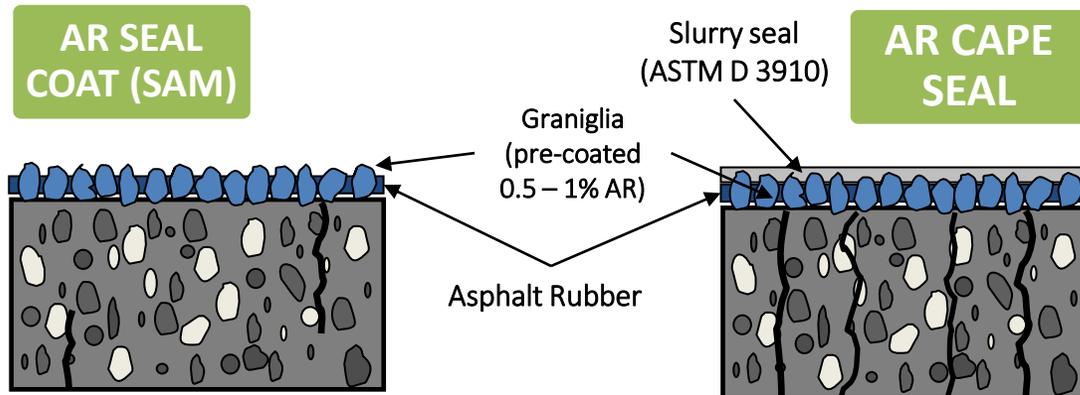


Compattazione (rulli a pneumatico):
avanzamento in retromarcia



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 |

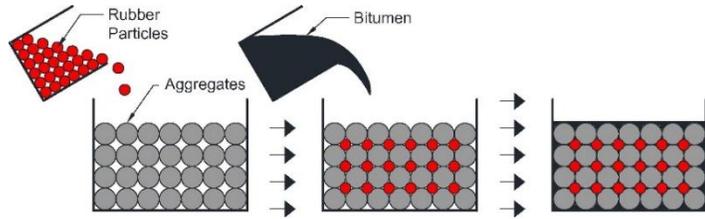
Tassi di spandimento

| | Dosaggio AR (L/m ²) |
|---------------|---------------------------------|
| PCI = 25 - 35 | 2.5–3.0 |
| PCI = 35 - 55 | 2.0–2.5 |

| SEAL COAT | Dosaggio granulato (kg/m ²) |
|---------------|---|
| PCI = 25 - 40 | 12.0–16.0 (type A) |
| PCI = 40 - 55 | 10.5–13.5 (type B) |

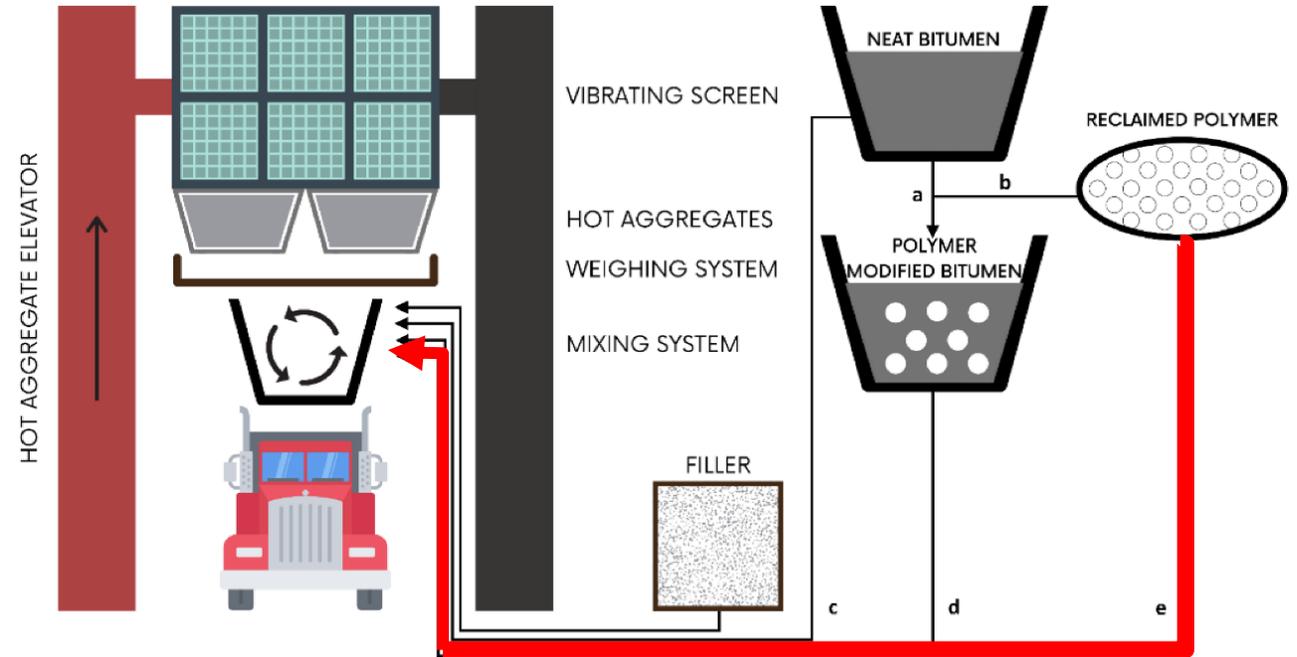
Recupero dell'aderenza e dell'impermeabilità della superficie stradale

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 |

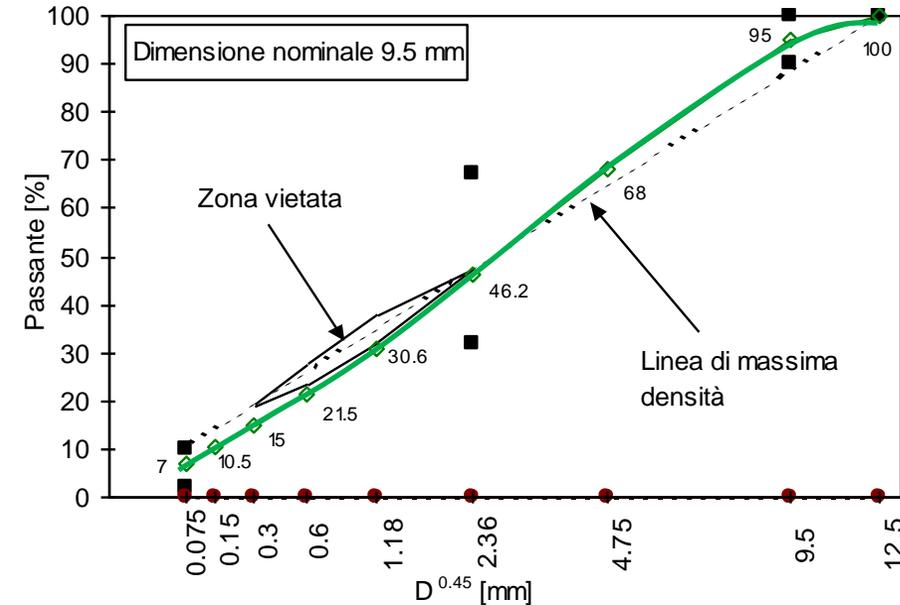


Figura 1 – Assortimento granulometrico miscela aggregati secondo SUPERPAVE



| Bitume | Pen 25°C [dmm] | Temp. P.A. [°C] | IP secondo Pfeiffer | Gruppi componenti [%] | | | | %Asfalteni %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 |

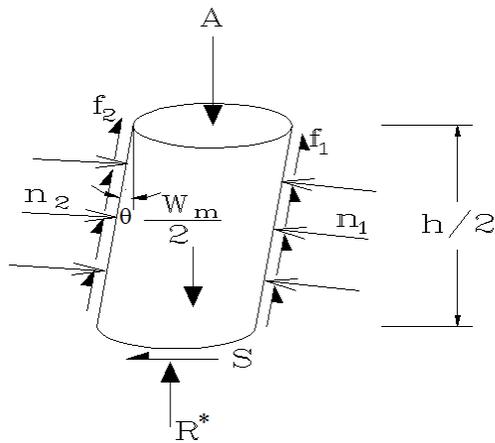
Tabella - Caratteristiche e gruppi componenti dei bitumi utilizzati

1. CARATTERIZZAZIONE COMPONENTI

Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi

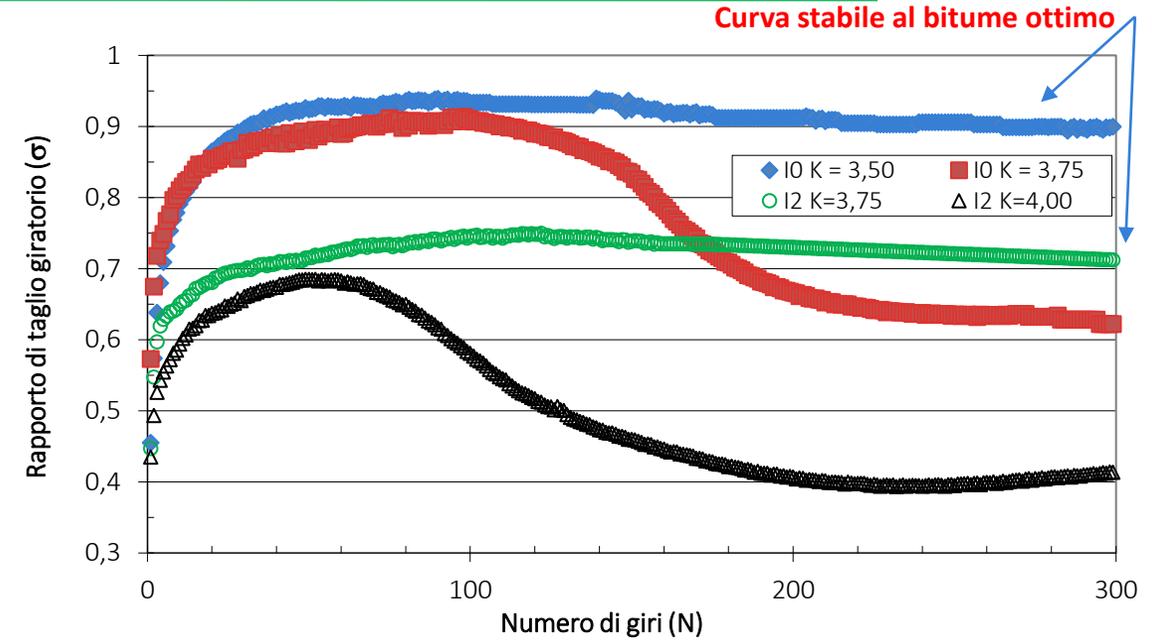
| Valori Stimati | %AC @ 4% Va | %G _{mm} * @ N _{init} = 8 | %G _{mm} * @ N _{design} = 100 | %G _{mm} * @ N _{max} = 159 | %VMA @ N _{design} | %VFA @ N _{Design} |
|---------------------------------|----------------|---|---|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Criteri 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/cm³)

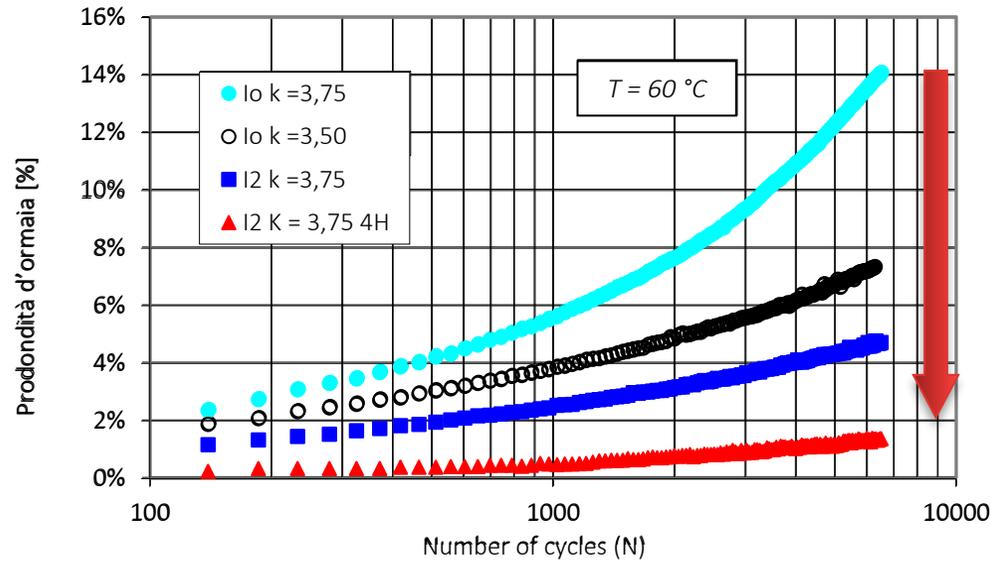


2. MIX DESIGN VOLUMETRICO

| Miscela(*) | CRM [%] | b [%] | Modulo di ricchezza K | Va | | MVA | |
|--------------|---------|-------|-----------------------|-----------|--------------------|----------------------------|--------------------|
| | | | | Media [%] | Coeff. variaz. [%] | Media [g/cm ³] | 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



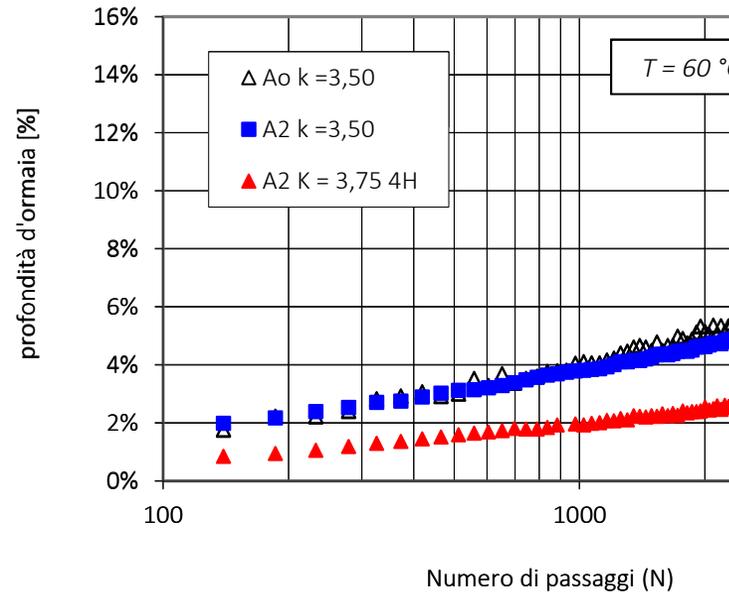
Aumento rigidezza alle alte T

=

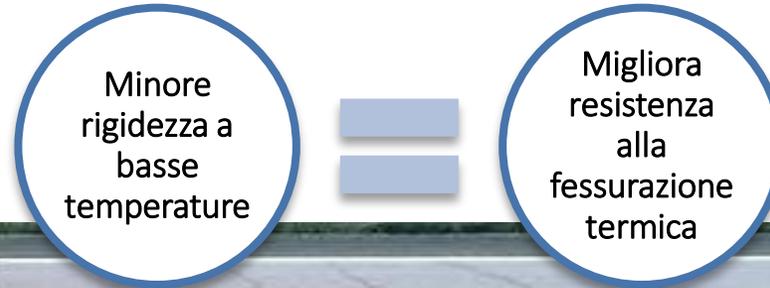
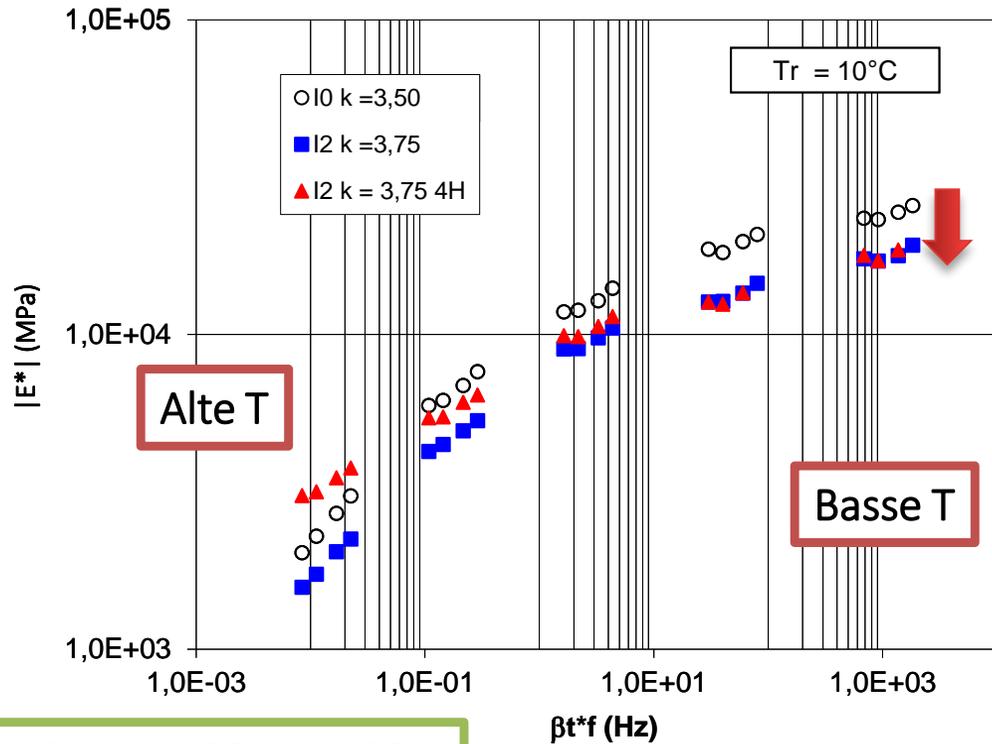
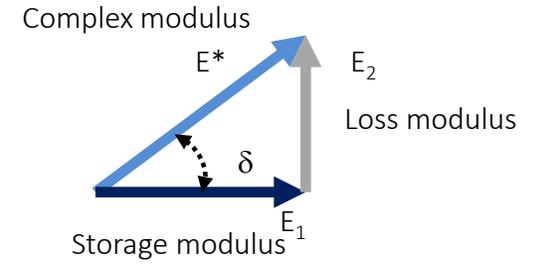
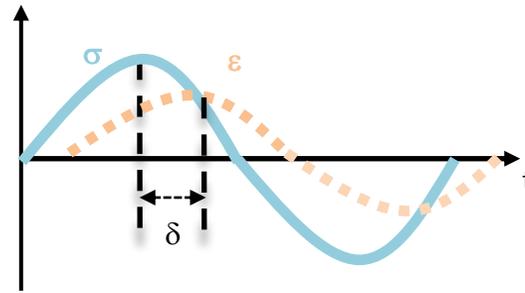
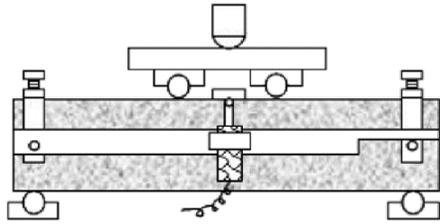
Migliora resistenza all'accumulo di ormaie

| 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

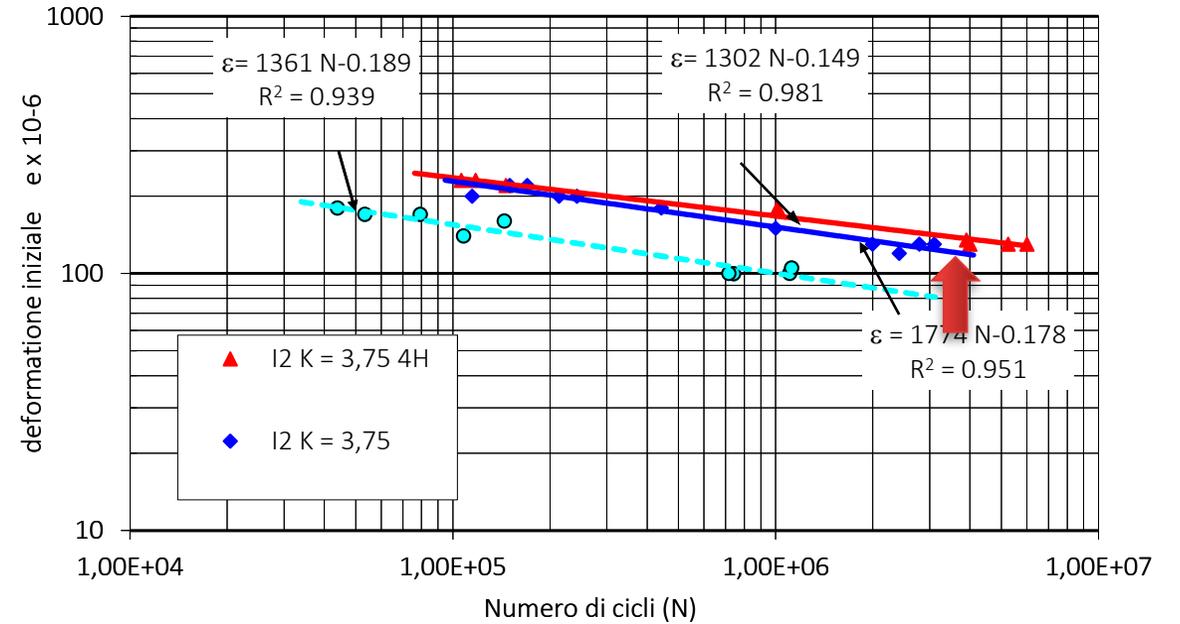
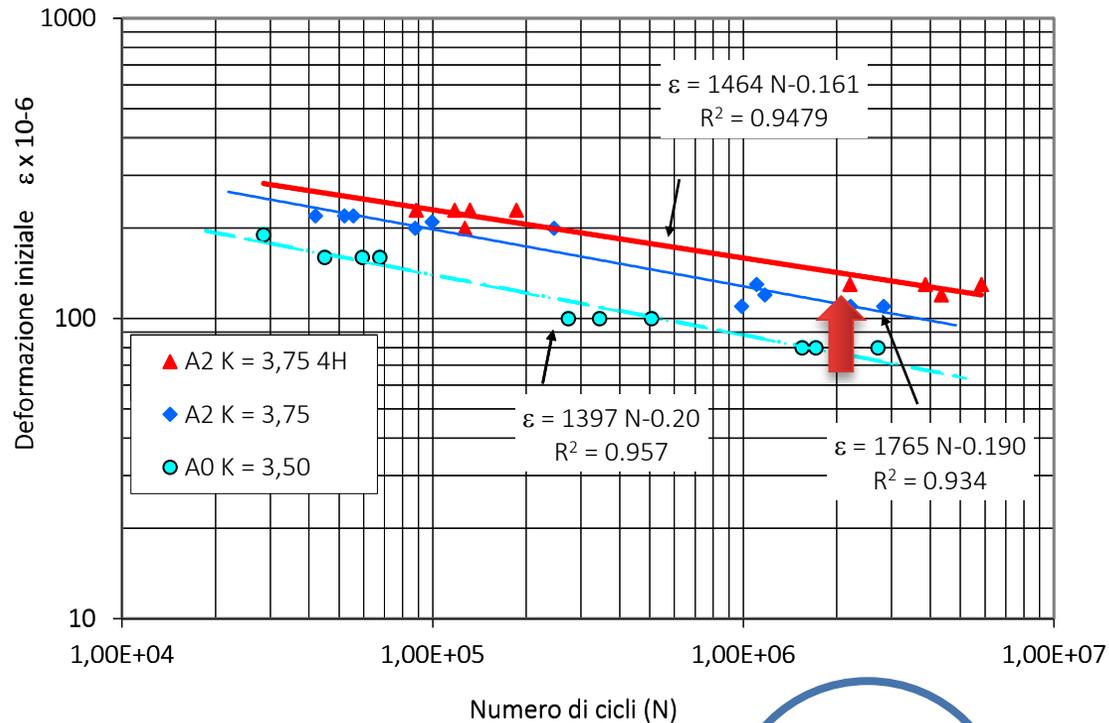


Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi



3. MODULO COMPLESSO

Impiego nelle pavimentazioni: conglomerati bituminosi



4. COMPORTAMENTO A FATICA

Aumento
cicli a
rottura per a
fatica



Migliora
resistenza
alla
fessurazione
flessionale



Impiego nelle pavimentazioni: WET & DRY

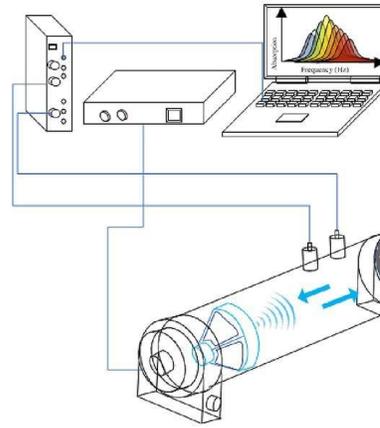
MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI ACUSTICHE

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

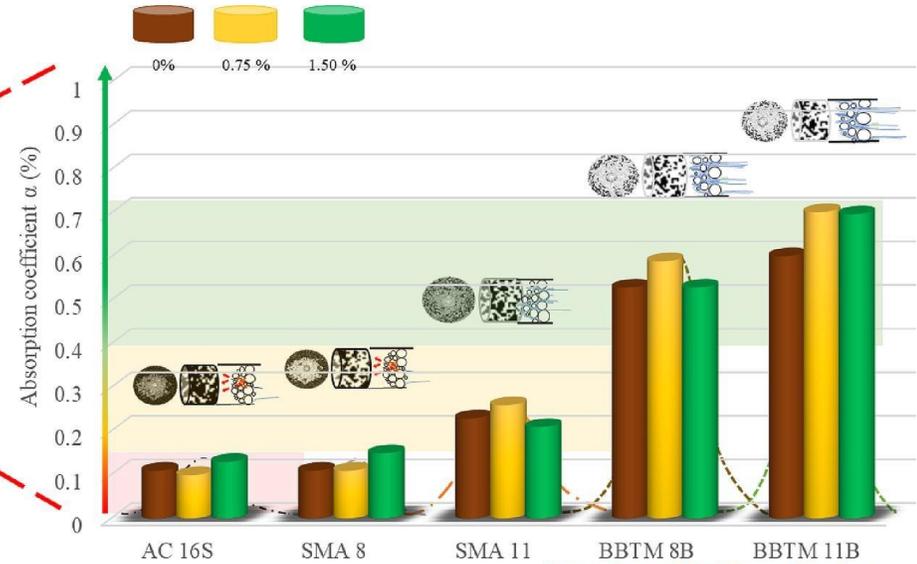
IN SITO: emissioni ridotte rispetto alle pavimentazioni convenzionali flessibili

| 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 |

Damping and noise reduction

K: Stiffness of tire-pavement system
 C: Damping coefficient of tire-pavement system
 m: Vibration quality of tire-pavement systems
 G: Pavement considered rigid

* 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.

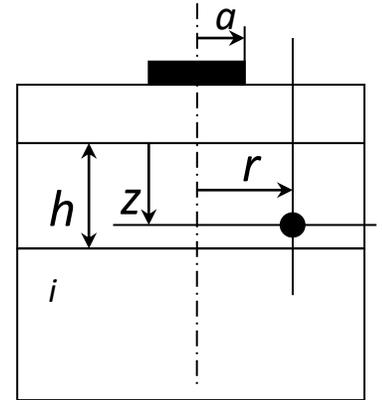
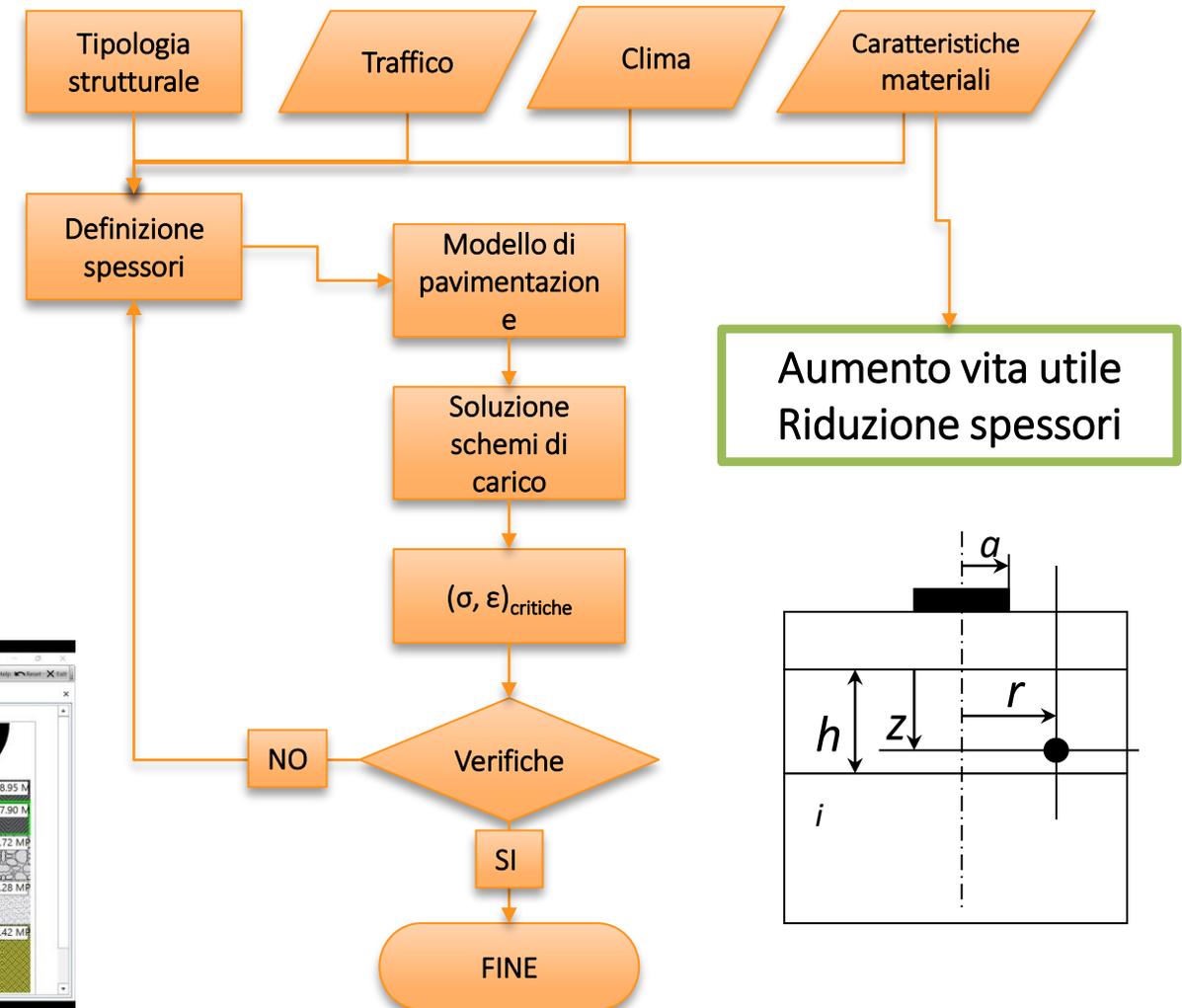
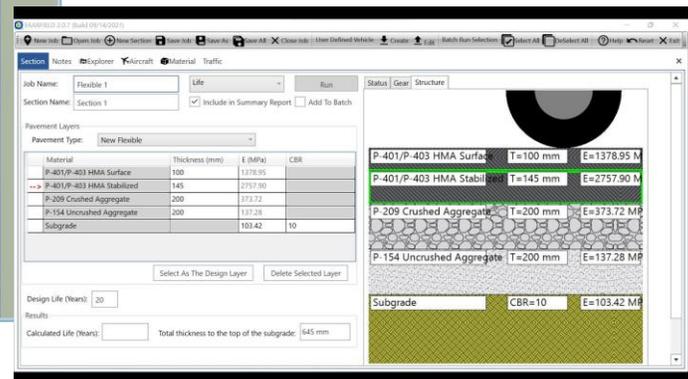
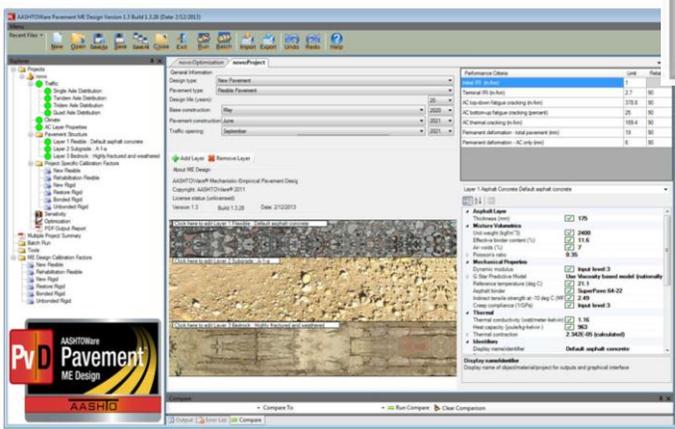
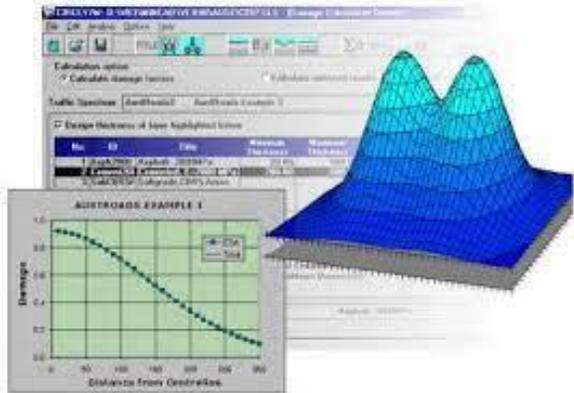
Convenienza tecnica: WET & DRY

PRESTAZIONI MECCANICHE

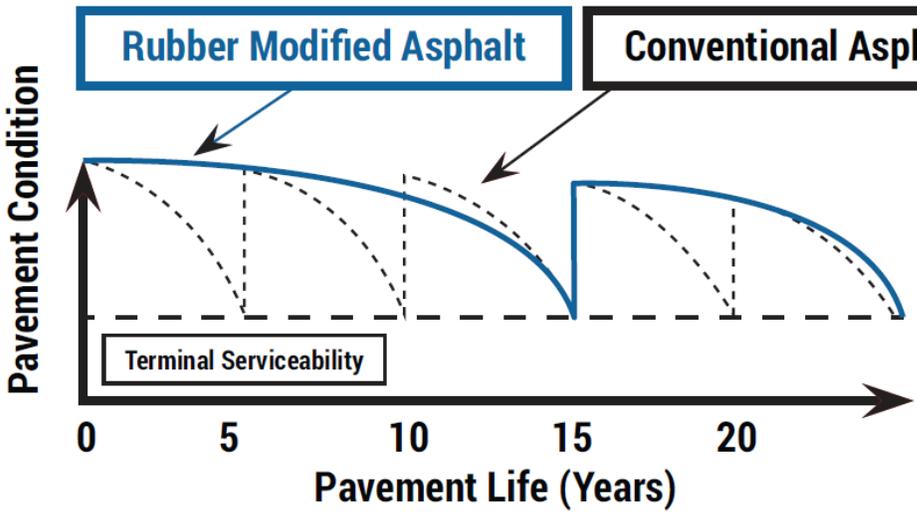
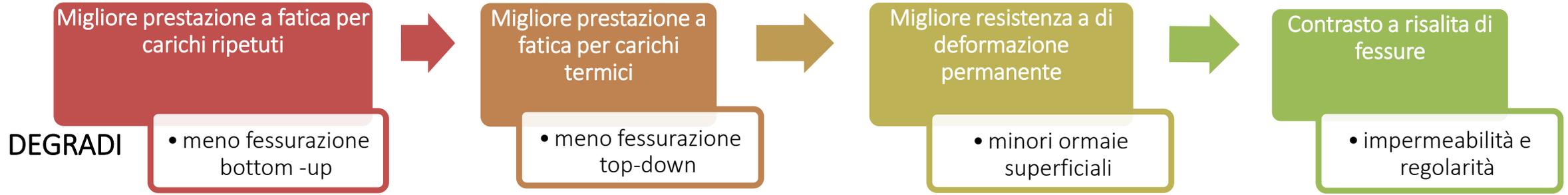


A42 2007 15° 10 Hz

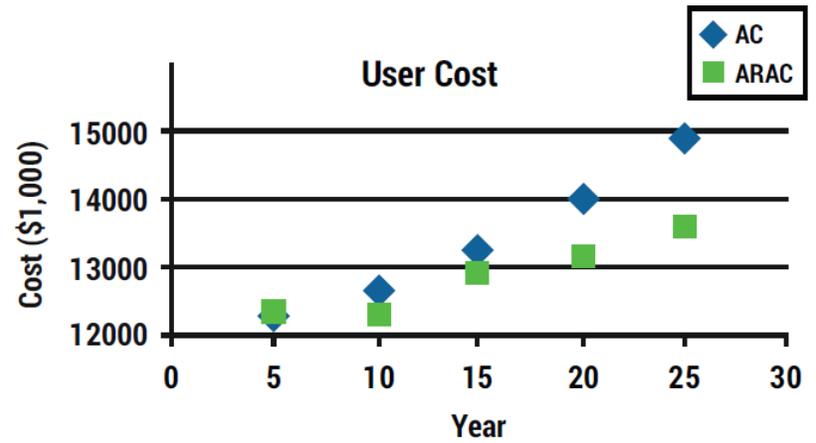
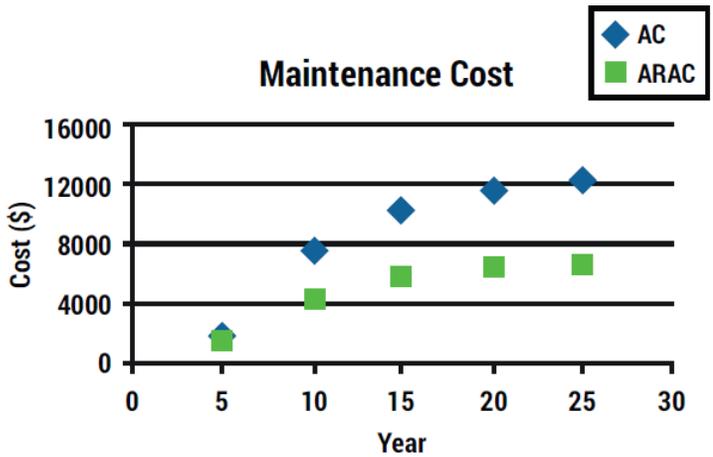
| épais. (m) | module (MPa) | coef. Poisson | Zcalcol (m) | EpsT ($\mu\text{déf}$) | SigmaT (MPa) | EpsZ ($\mu\text{déf}$) | SigmaZ (MPa) |
|------------|--------------|---------------|-------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| 0.020 | 4000.0 | 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 | 4.2 | 0.332 | 27.5 | 0.550 |
| collé | | | 0.075 | 4.2 | 0.303 | 31.3 | 0.550 |
| 0.090 | 9000.0 | 0.350 | 0.165 | -19.8 | -0.158 | 34.2 | 0.227 |
| collé | | | 0.165 | -19.8 | -0.159 | 32.4 | 0.227 |
| 0.100 | 9000.0 | 0.250 | 0.265 | -65.8 | -0.705 | 39.2 | 0.041 |
| collé | | | 0.265 | -65.8 | 0.004 | 183.5 | 0.041 |
| infini | 200.0 | 0.350 | 0.265 | | | | |



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 ormaio**, 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**

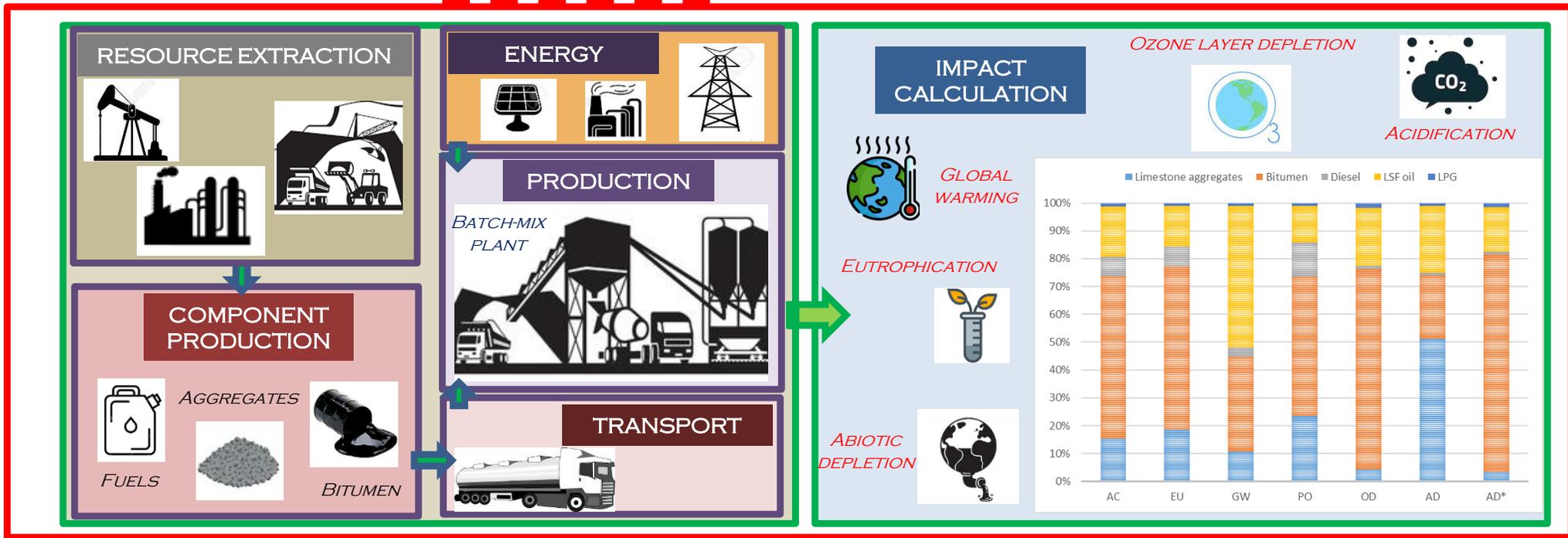
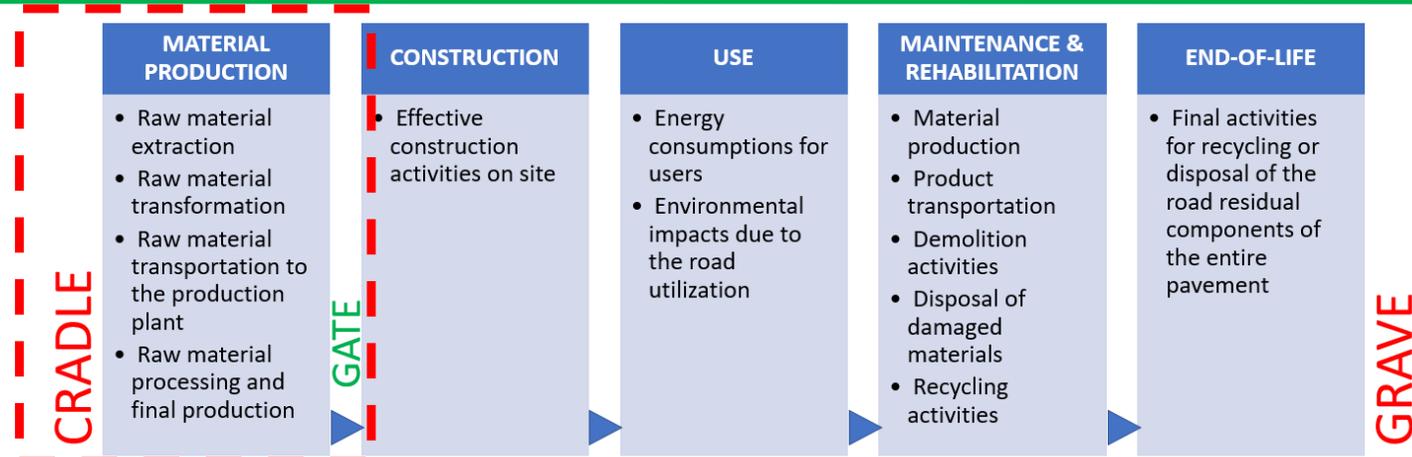


«Le prime vere applicazioni di pavimentazioni Asphalt Rubber in Italia sono state realizzate a Imola, Pistoia e Firenze nel 2007..»
da <https://www.asphaltrubberitalia.com>

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

Convenienza ambientale

Life Cycle Analysis



Convenienza ambientale

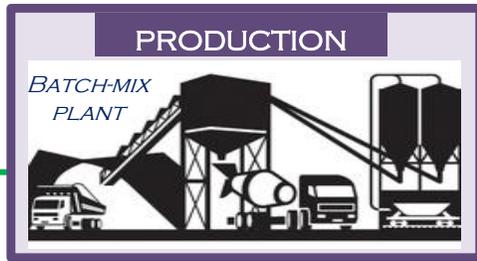
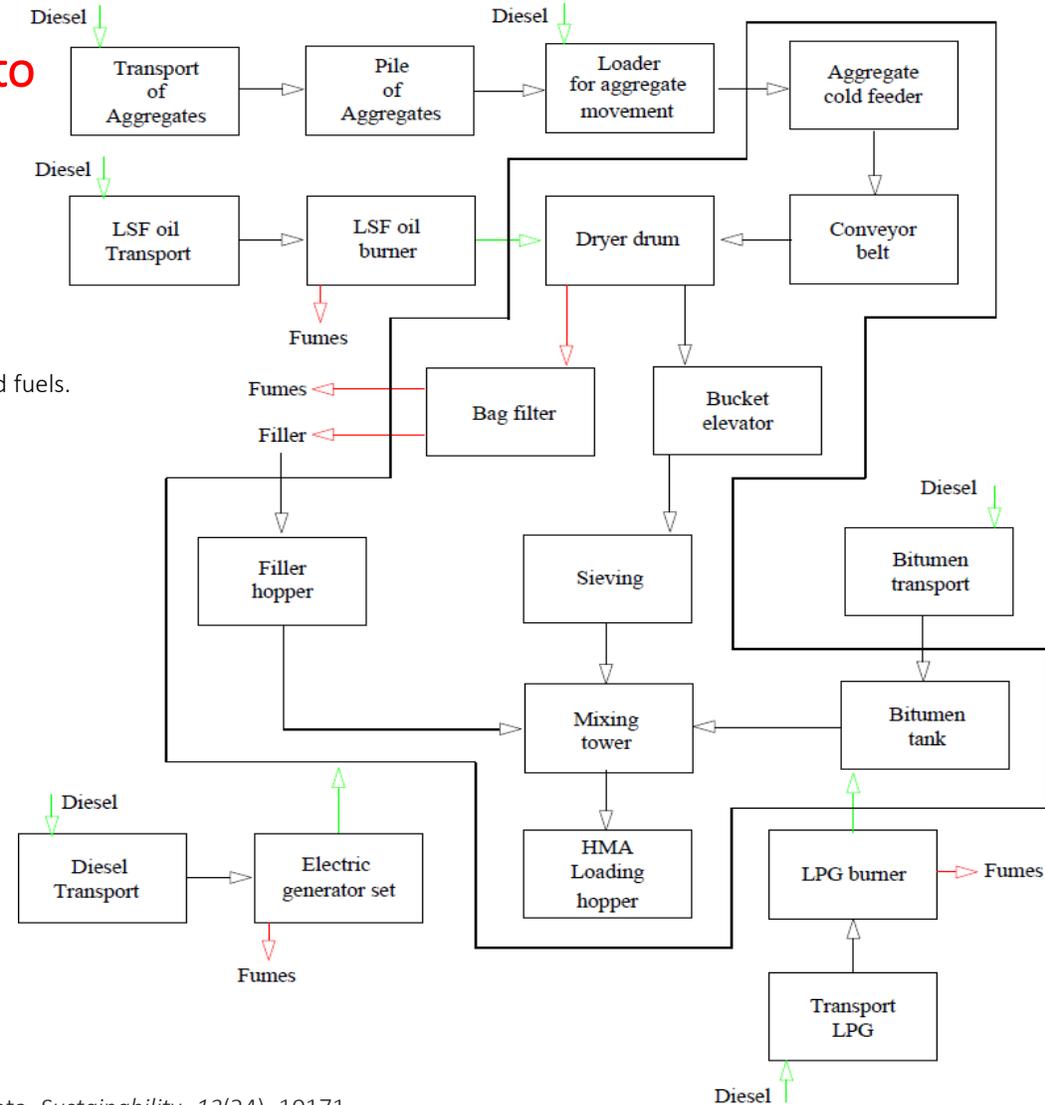


Fig. Production processes of a batch-mix asphalt production plant



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. Electricity demand of the main plant components per DU

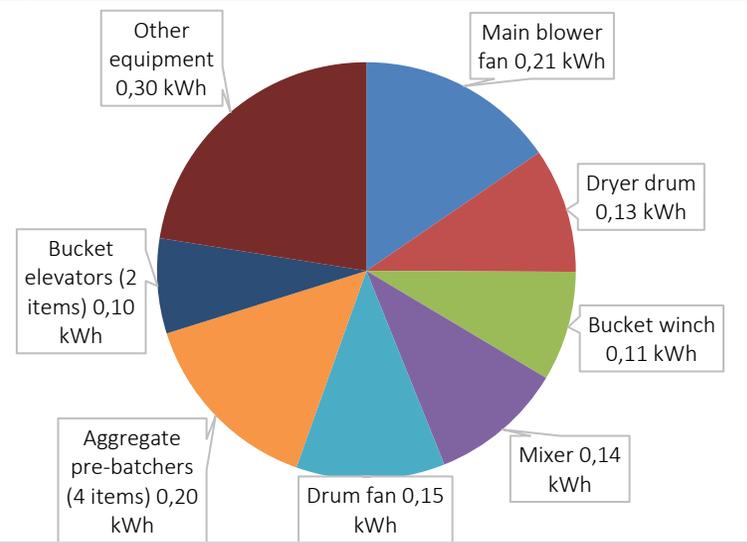


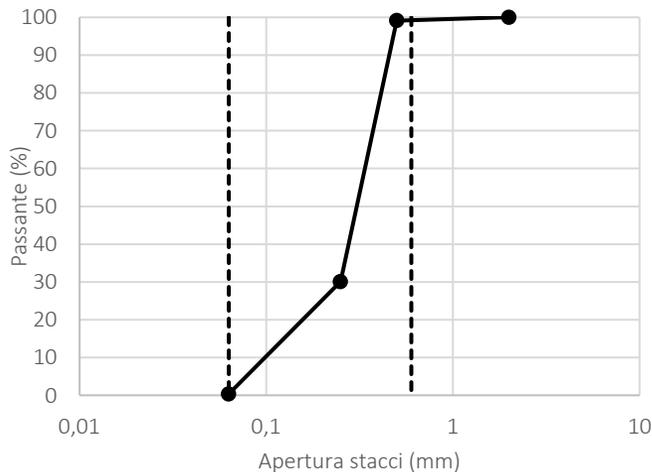
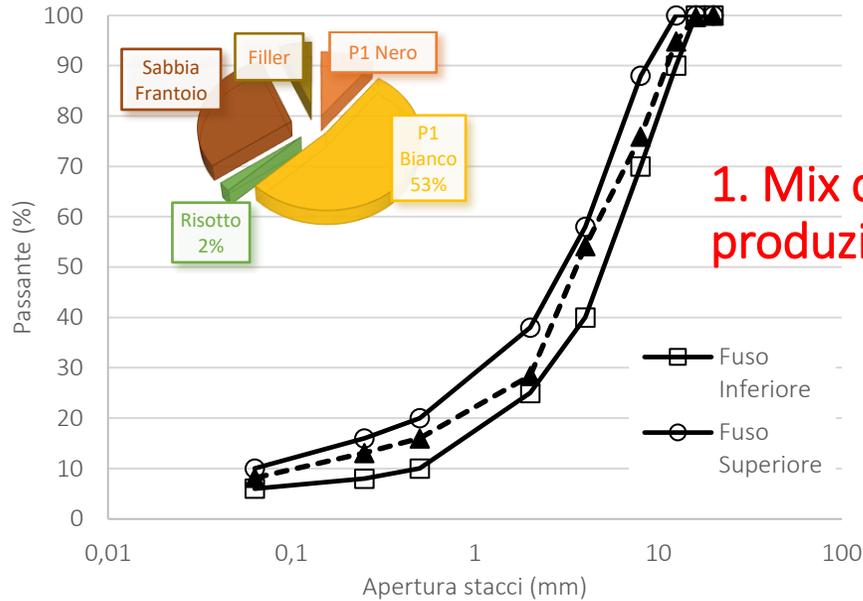
Table . Fuel consumption for production of a DU of asphalt mixture in the plant.

| 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 |

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 (γ) | g/cm ³ | 1,182 |

| Miscele | % b | vuoti [%] | | |
|---------------------|------|----------------|----------------|----------------|
| | | N ₁ | N ₂ | N ₃ |
| 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 |

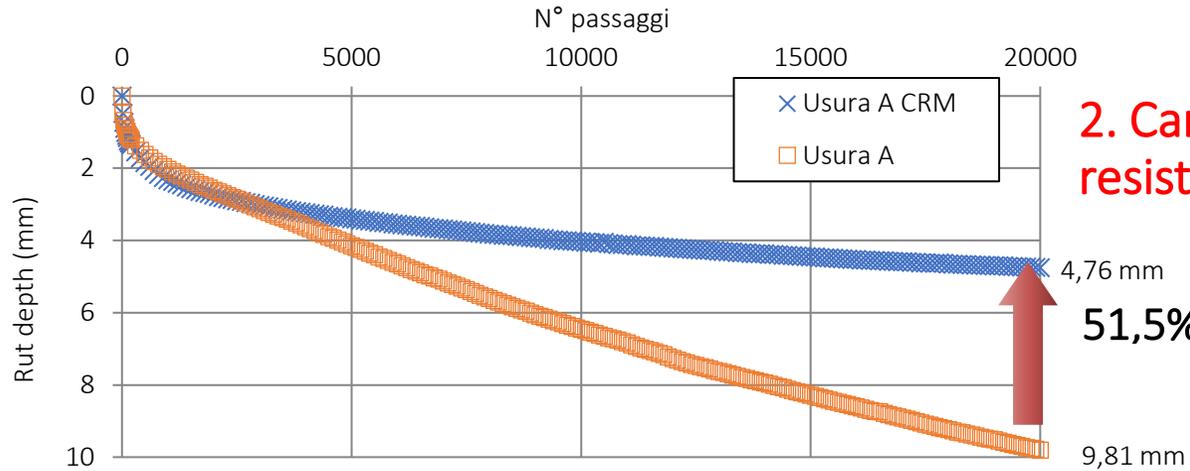
| Requisiti Cap. Anas | bitume T.Q. | bitume Mod. |
|---------------------------------------|-------------|-------------|
| $R_{t,medio}$ (GPa*10 ⁻³) | 0,72-1,60 | 0,95-1,90 |
| CTI_{medio} (GPa*10 ⁻³) | ≥ 65 | ≥ 75 |

Prova ITS (UNI EN 12697-23:2018)

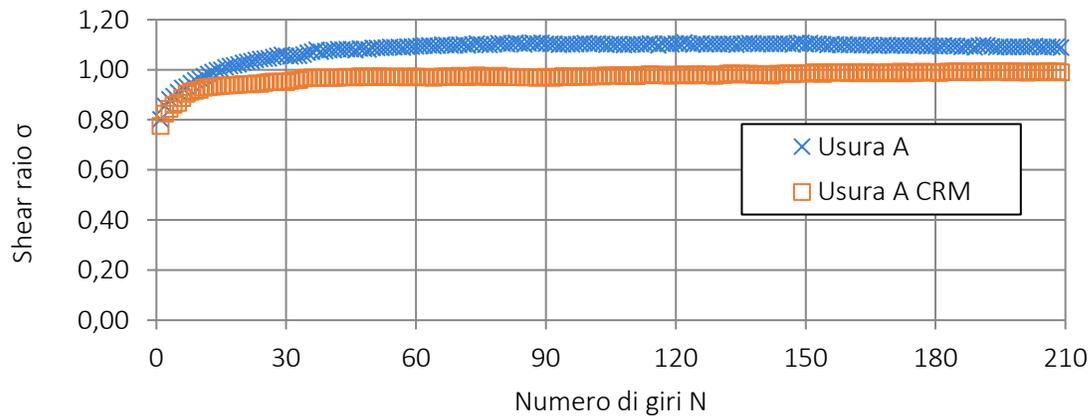
| Miscele | % b | $R_{t,medio}$ (GPa*10 ⁻³) | CTI_{medio} (GPa*10 ⁻³) |
|-------------|------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Usura A | 4,5 | 2,21 | 178 |
| Usura A | 5,0 | 1,61 | 99 |
| Usura A | 5,5 | 1,62 | 79 |
| Usura A | 6,0 | 1,33 | 67 |
| Usura 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 |

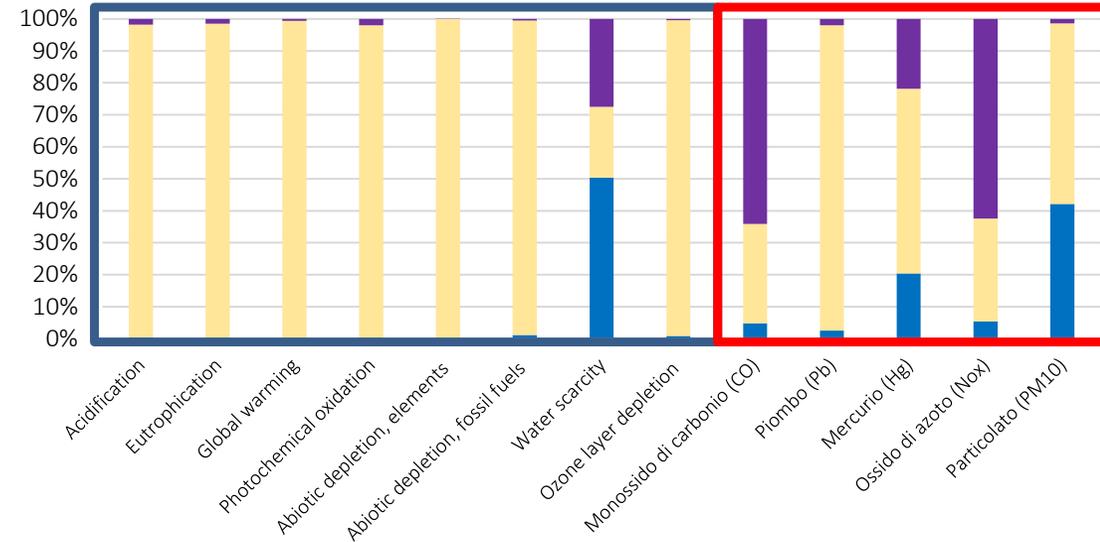


Convenienza ambientale

4. Analisi degli impatti

| Categorie di impatto | Unità | Prod. materia prima | Trasporto | Prod. 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 |

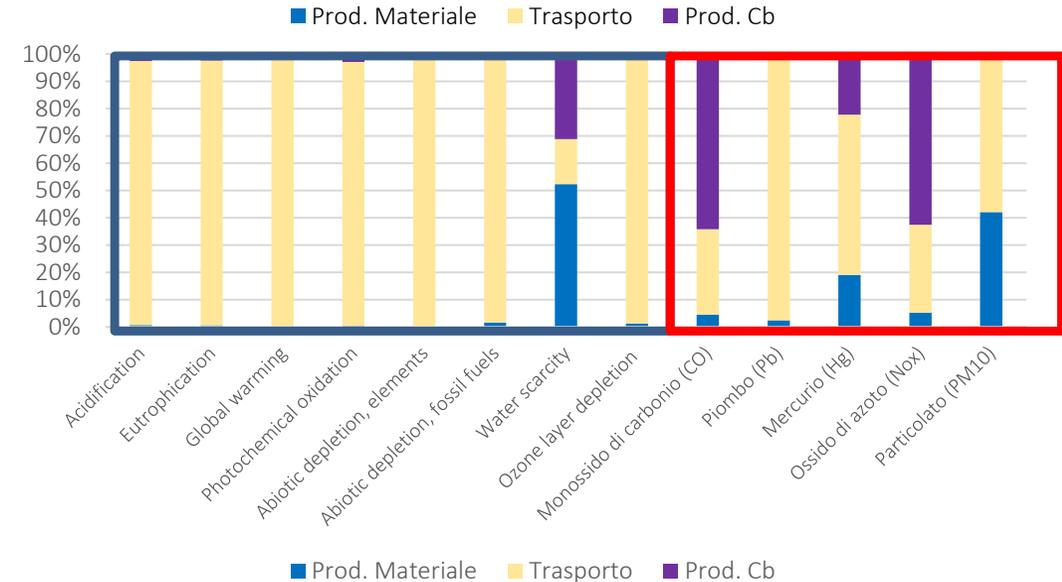
Usura A



↓ riduzione

| Categorie di impatto | Unità | Prod. materia prima | Trasporto | Prod. 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 |

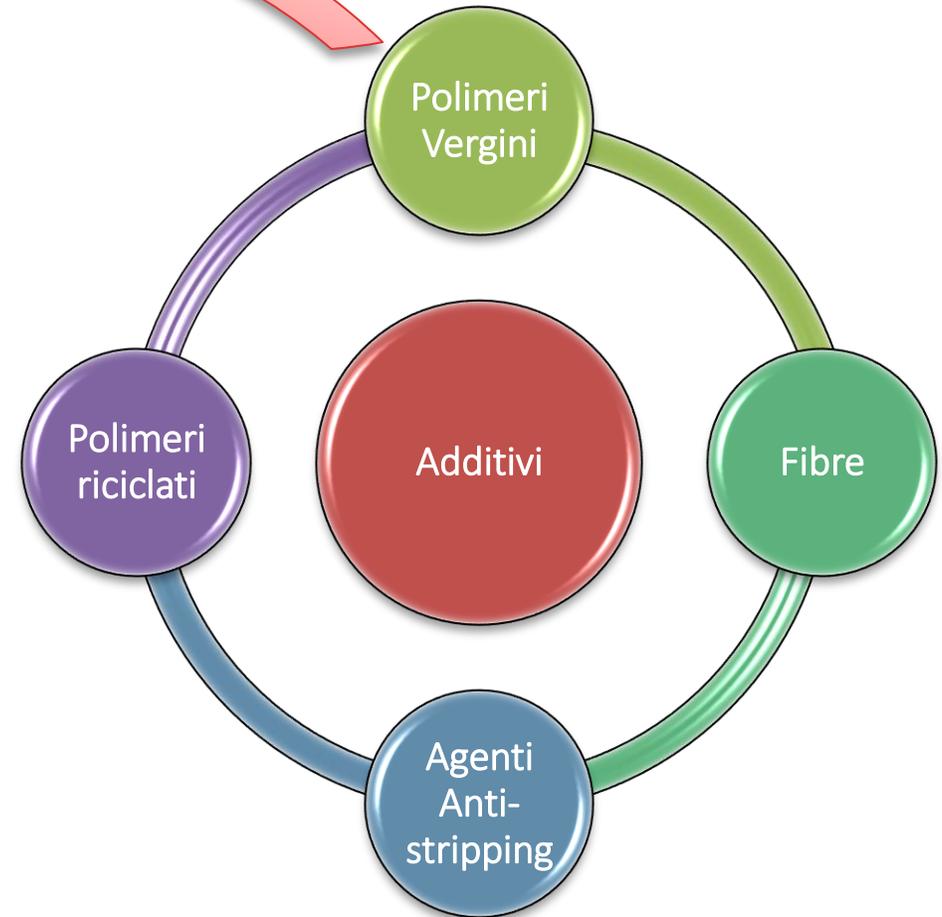
Usura A CRM



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 |



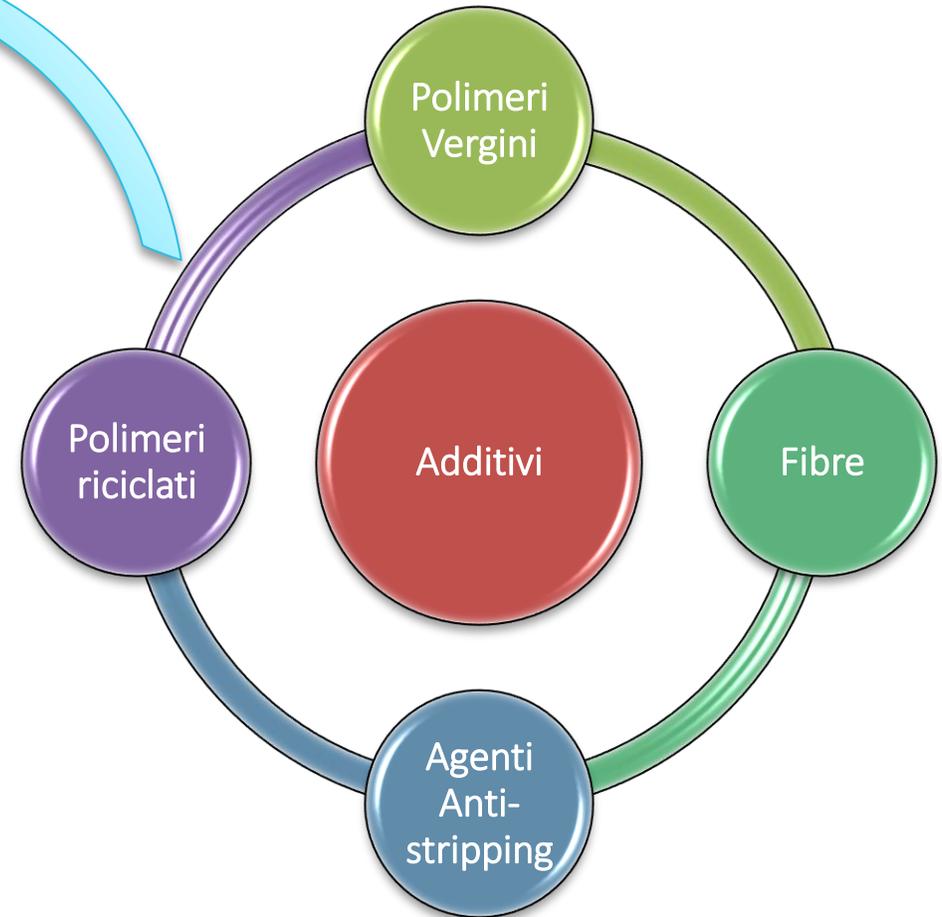
¹ Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54, 18-38.

² 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"> Gomma triturata da PFU¹  | <ul style="list-style-type: none"> Incremento di elasticità Resistenza ormaiamento | <ul style="list-style-type: none"> Problemi Stabilità stoccaggio WET |
| <ul style="list-style-type: none"> Plastiche da RSU (PLASMIX)²  | <ul style="list-style-type: none"> Incremento rigidezza  | <ul style="list-style-type: none"> Problemi Stabilità allo stoccaggio Limitato incremento di elasticità Elevata eterogeneità |
| <ul style="list-style-type: none"> Scarti di riciclo di teli di serra³  | <ul style="list-style-type: none"> Resistenza ormaiamento Incremento rigidezza Riduzione suscettività termica | <ul style="list-style-type: none"> Problemi di separazione delle fasi Problemi di compatibilità |
| <ul style="list-style-type: none"> Reti da pesca dismesse | In relazione al polimero di base | |

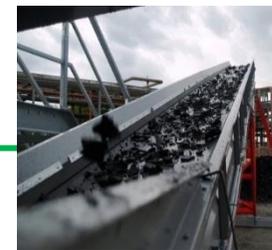


¹Celauro, C., & Di Francisca, A. (2003). Impiego del granulato di gomma da pneumatici usati in tecnica stradale. *Strade & Autostrade*, (5), 10-20.

²Celauro, 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.

³Celauro, B., Tesoriere, G., & Celauro, C. (2006). Proprietà strutturali di conglomerati bituminosi migliorati con plastiche post-uso. In *XVI Convegno Nazionale SIV-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



Clara Celauro

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

Dipartimento di Ingegneria - UNIPA
clara.celauro@unipa.it



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

MOST
CENTRO NAZIONALE PER LA MOBILITÀ SOSTENIBILE

