

# STRADE ECO – SOSTENIBILI

Innovazioni tecnologiche per la riduzione dei consumi energetici e delle emissioni da traffico

**Lorenzo DOMENICHINI**

Università di Firenze  
Dipartimento di Ingegneria Civile  
[lorenzo.domenichini@unifi.it](mailto:lorenzo.domenichini@unifi.it)



**TEMA**  
**CRESCITA “ECO-COMPATIBILE”**  
**(SOSTENIBILE)**  
**DEL SISTEMA DI TRASPORTI**

**Alla ricerca di un delicato equilibrio tra  
MOBILITA' e PROPRIETA' AMBIENTALI**

**AUTUMN COLOURS ON A LAKE IN ALGONQUIN PROVINCIAL PARK, ONTARIO**

# EFFETTI DELLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO SULL'AMBIENTE NATURALE E ANTROPIZZATO

INTERAZIONE TRA UTILIZZO DEL SUOLO, INFRASTRUTTURE DI  
TRASPORTO E QUALITA' AMBIENTALI

## EFFETTI DIRETTI ED INDIRETTI DELL'AMBIENTE COSTRUITO



**CRESCITA ECO - SOSTENIBILE**  
**MECCANISMI PER MIGLIORARE LA QUALITA' AMBIENTALE**  
**EQUILIBRIO DELICATO TRA MOBILITA' E PRIORITA' AMBIENTALI**  
**SEEKING A BALANCE**

# LA PROGETTAZIONE AMBIENTALE DI UNA INFRASTRUTTURA STRADALE

Definizione delle caratteristiche fisiche delle strade e delle modalità di gestione del traffico che consentano di tradurre in pratica l'obiettivo del raggiungimento di una situazione di equilibrio tra le esigenze di mobilità e le proprietà ambientali del territorio attraversato



**“CAPACITA' AMBIENTALE”:**

**Valore del volume di traffico ammissibile in ciascuna specifica situazione in relazione alla sua compatibilità con il mantenimento di buone qualità ambientali**

**Concetto complesso da mettere in pratica, a causa della complessità delle interazioni tra trasporti ed ecosistema**



**Verifica delle ricadute ambientali delle soluzioni studiate e criteri di mitigazione degli effetti**

# SOLUZIONI E TECNOLOGIE “ECO-SOSTENIBILI” PER LA PROGETTAZIONE, COSTRUZIONE E GESTIONE DELLE STRADE

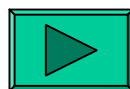
## 3 esempi:

- Il progetto di strade che consentano la riduzione delle emissioni prodotte dal traffico
- Le miscele “tiepide” per la realizzazione delle pavimentazioni stradali
- La progettazione integrata degli impianti tecnologici delle gallerie (il lavaggio termico dell’aria espulsa)

## Esempio n° 1

# INTERSEZIONE SS1 – SS 67 bis

Scelta della soluzione progettuale per il  
miglioramento della sicurezza  
nell'intersezione



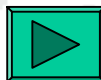
# INTERSEZIONE SS1 – SS 67 bis

## Attività diagnostica effettuata:

- Road Safety Review dell'intersezione
- Analisi dell'incidentalità nell'intersezione
  - Rilievo dei flussi di traffico 
- Rilievo delle velocità in approccio all'intersezione

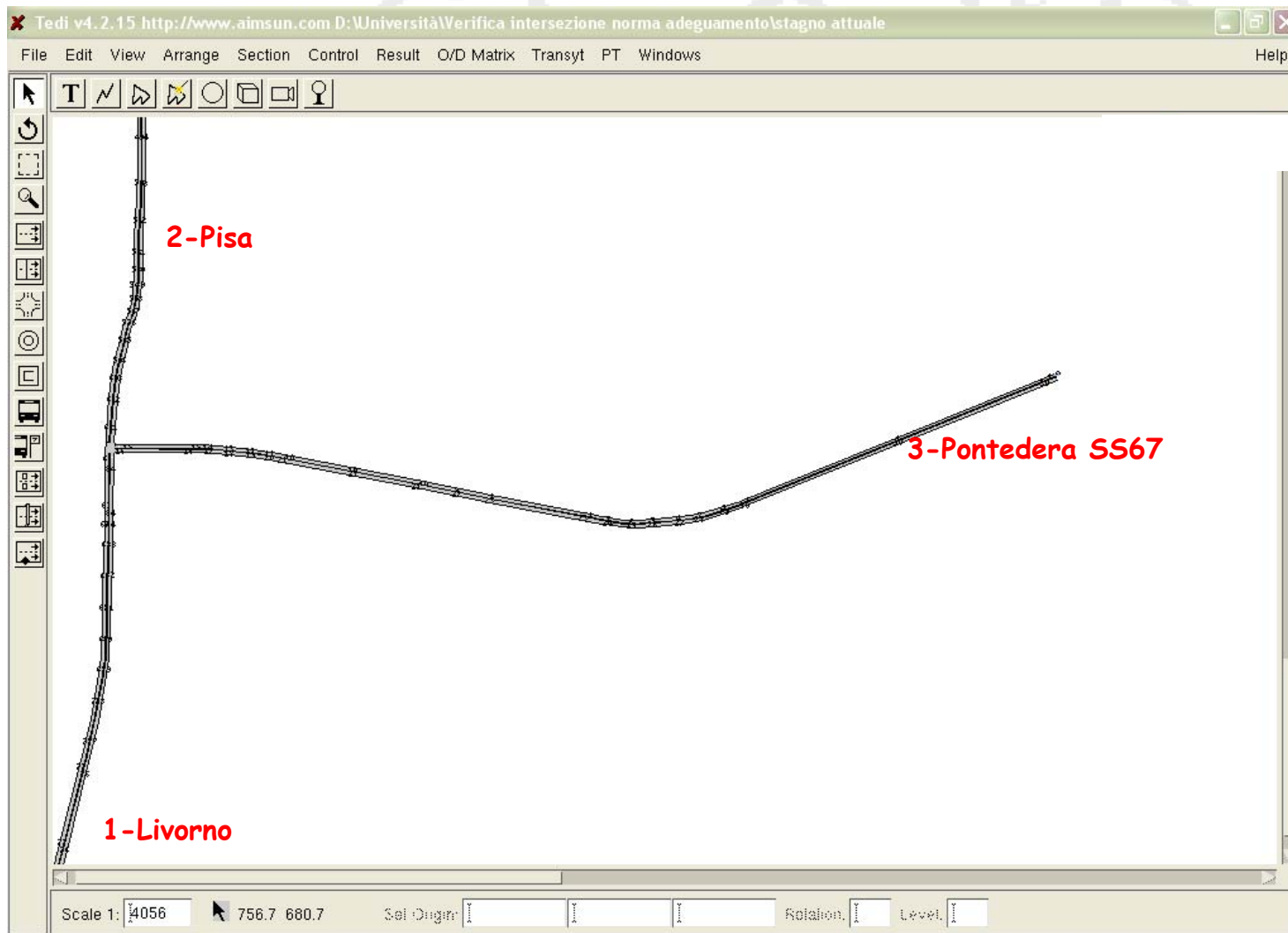
*Principale problema di sicurezza individuato:*

**MANCANZA DI VISIBILITA' PER LA SVOLTA A SINISTRA DALLA SS67bis ALLA SS1 in direzione Livorno**



# INTERSEZIONE SS1 – SS67 bis

Stato attuale

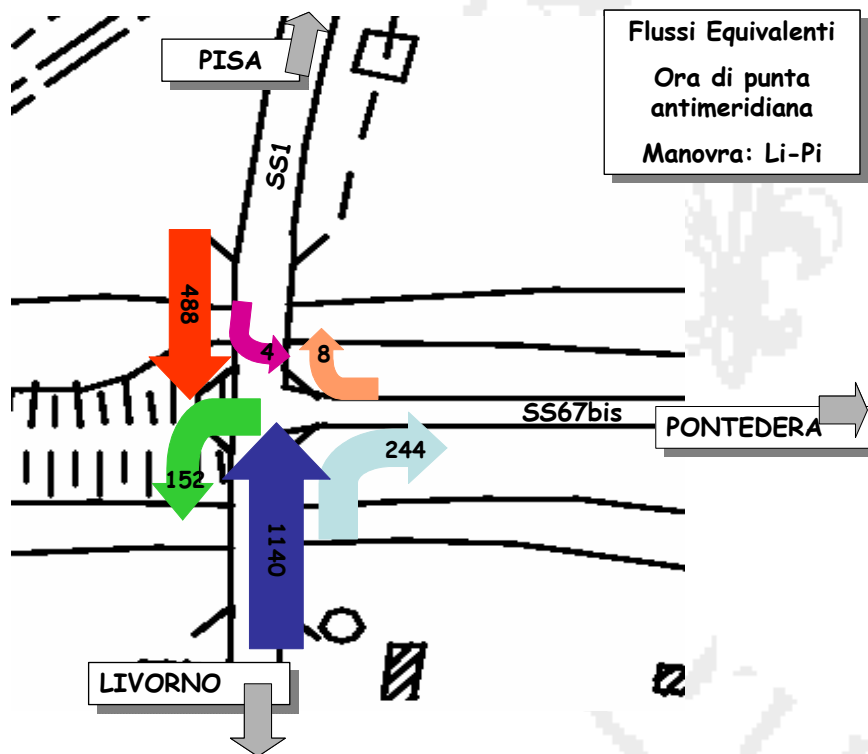




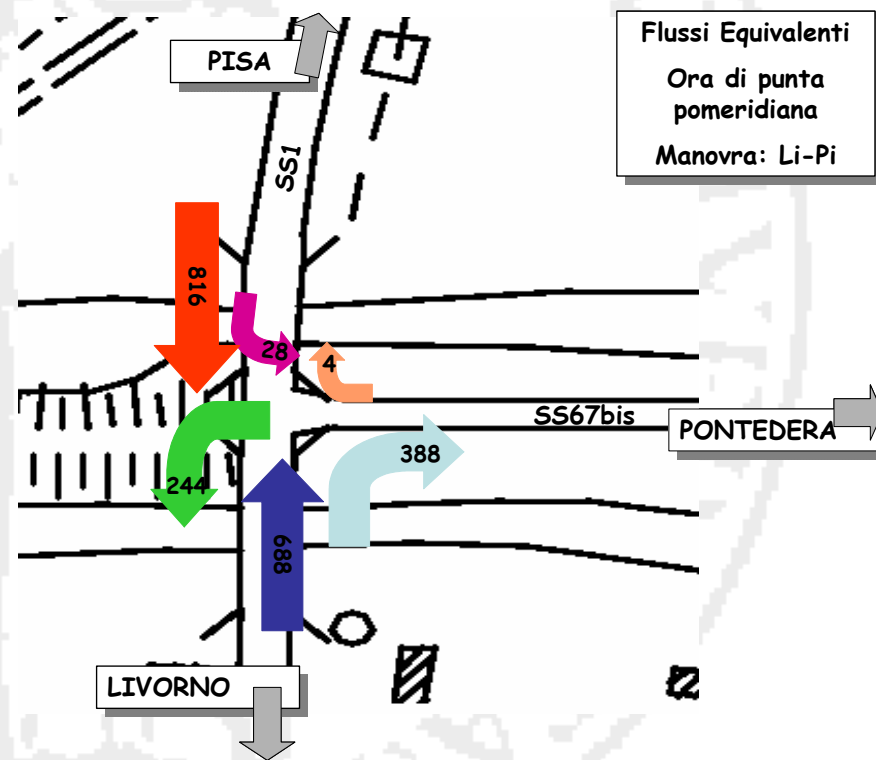
# INTERSEZIONE SS1 – SS67 bis

## Rilievo dei flussi di traffico

### Ora di punta antimeridiana



### Ora di punta pomeridiana



## INTERSEZIONE SS1 – SS 67 bis

### Soluzioni progettuali analizzate

*lo studio è stato svolto secondo quanto previsto dalla bozza della  
nuova norma per "l'adeguamento delle strade esistenti"*

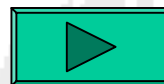
- Stato attuale (assunto quale riferimento prestazionale)



- Semaforizzazione dell'intersezione

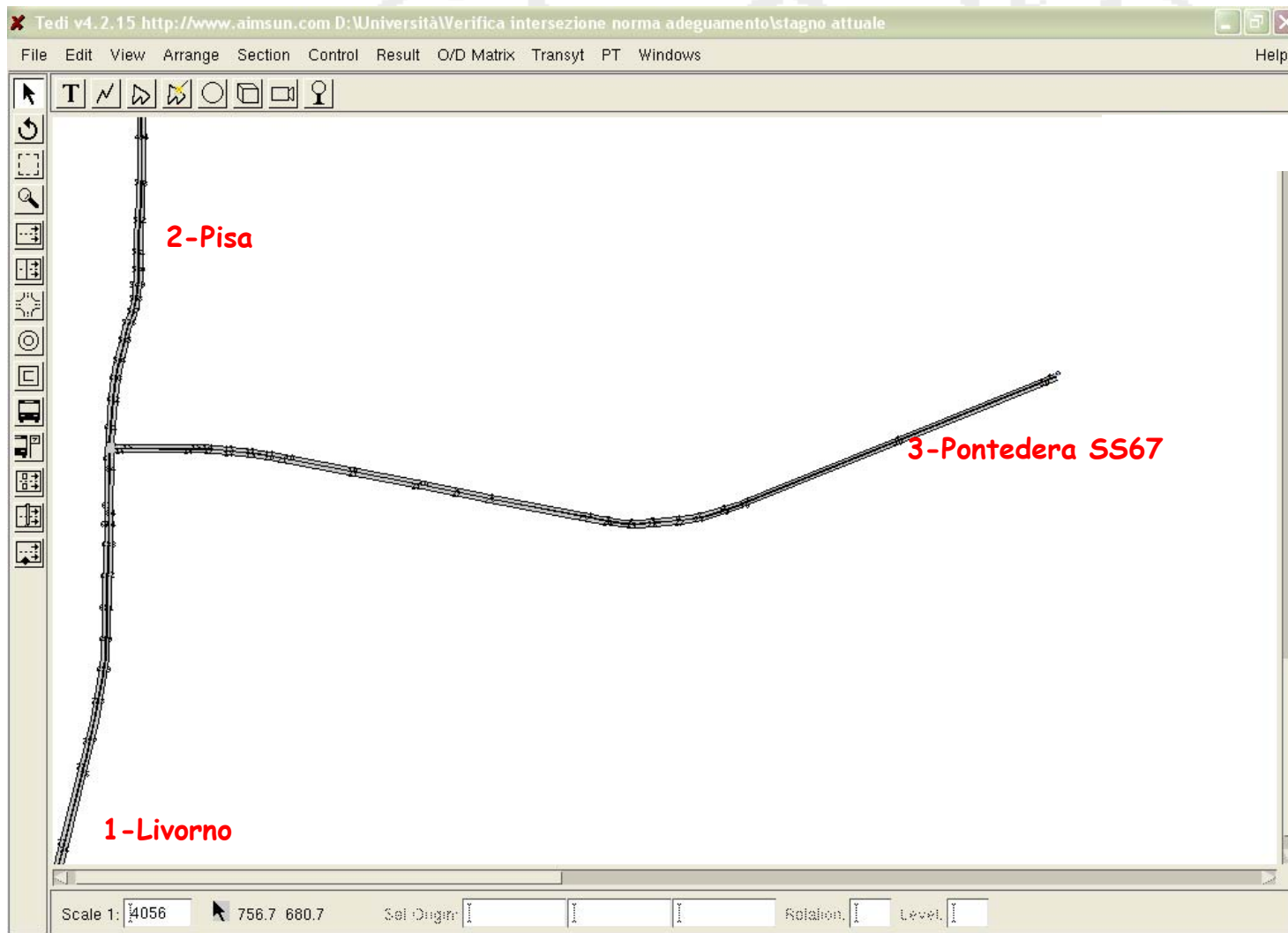


- Trasformazione dell'intersezione a T esistente in  
**ROTATORIA**



# INTERSEZIONE SS1 – SS67 bis

Stato attuale



# INTERSEZIONE SS1 – SS67 bis

## Semaforizzazione dell'incrocio

**Control Plan: AM**

Id	Name	Tvov	Status
1			FIX

**Graphic Phases**

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110

Ring 1: 1 (blue bar) 3 (red bar)

SGroup 2: 1 (green bar)

SGroup 1: 3 (red bar)

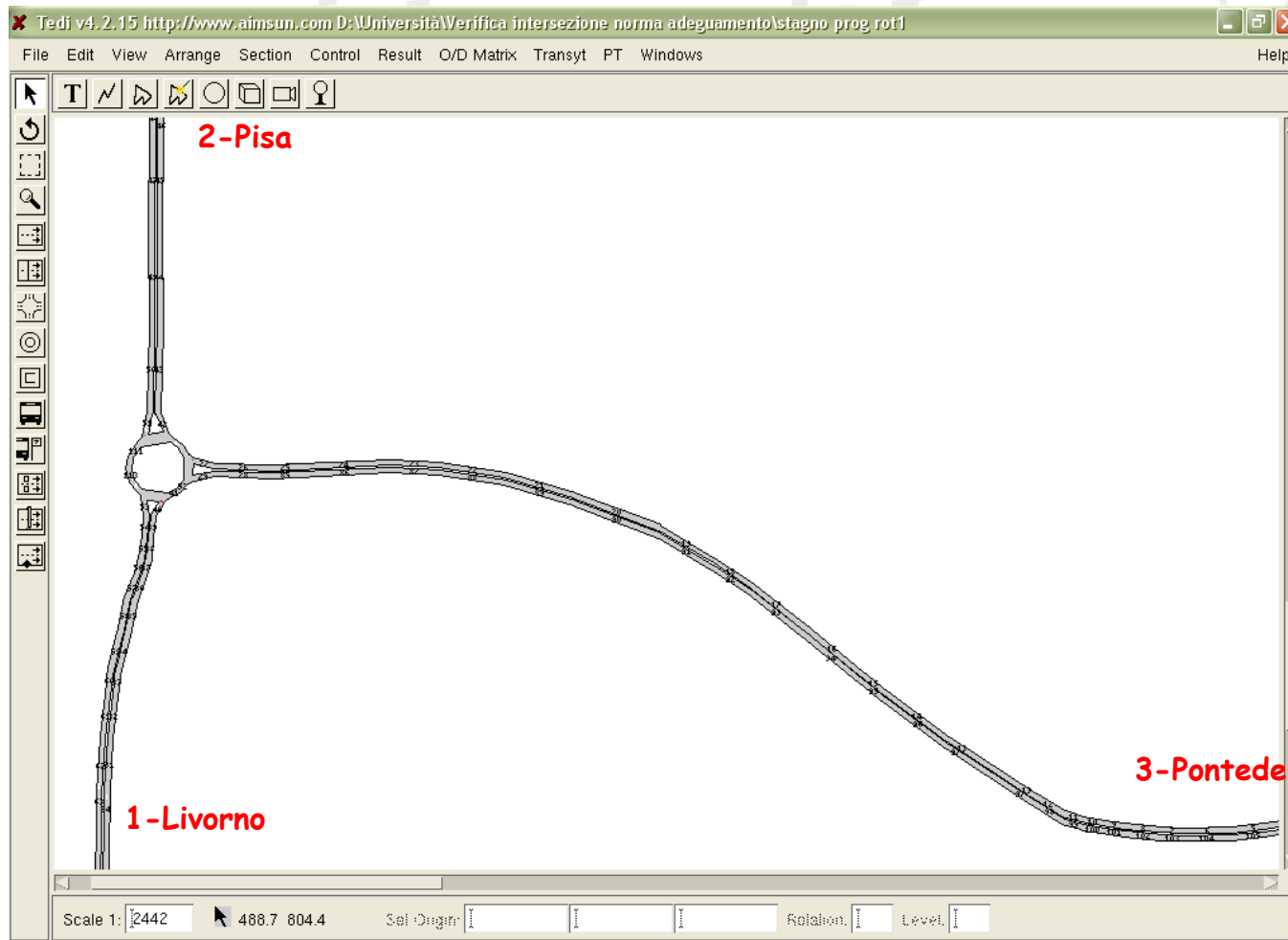
120.0

Scale 1: 2472    343.3 225.2    Sel. Digits: | |



# INTERSEZIONE SS1 – SS67 bis

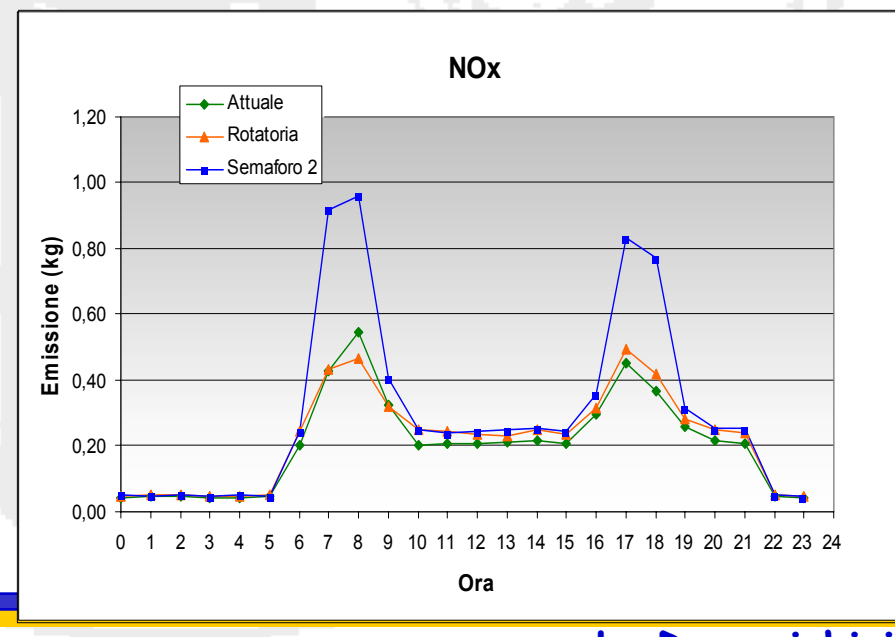
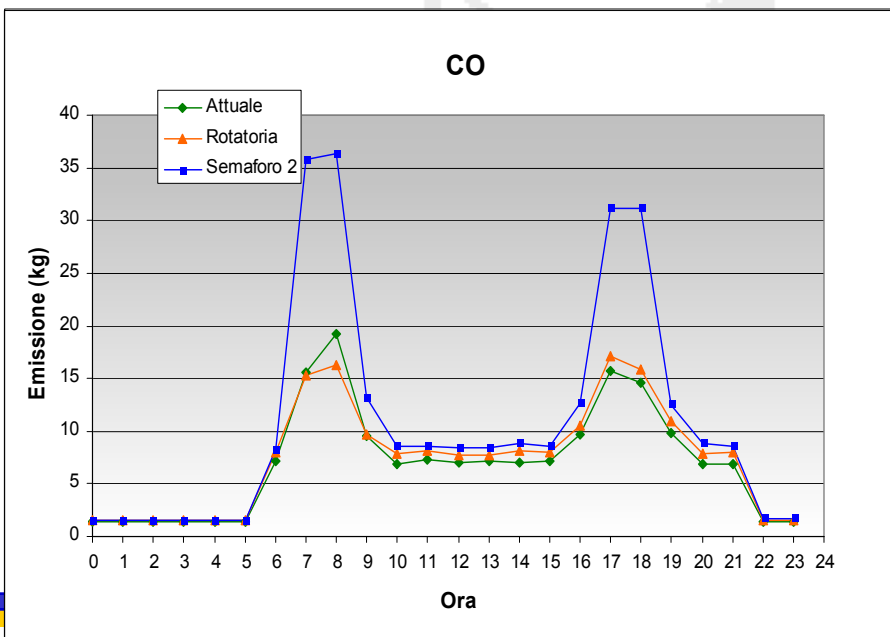
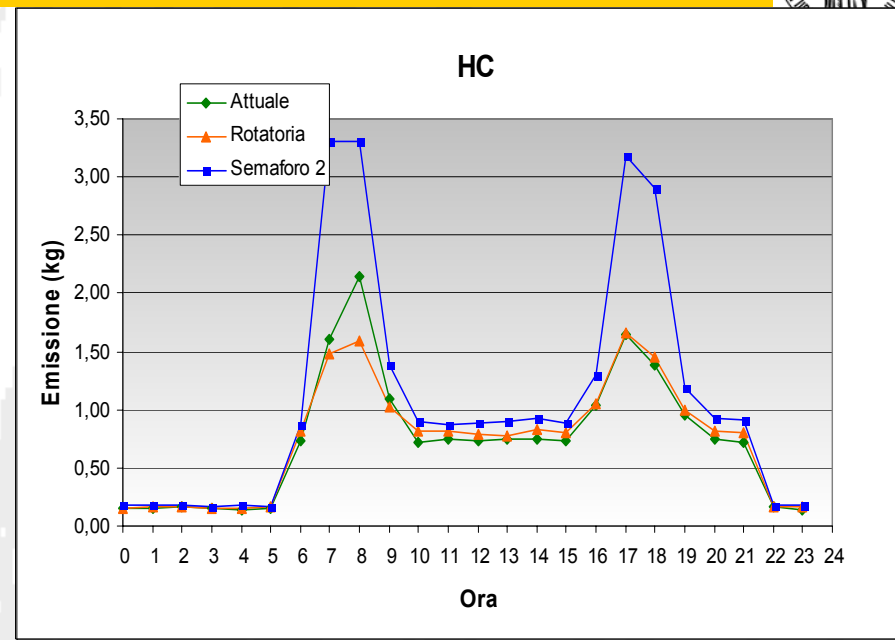
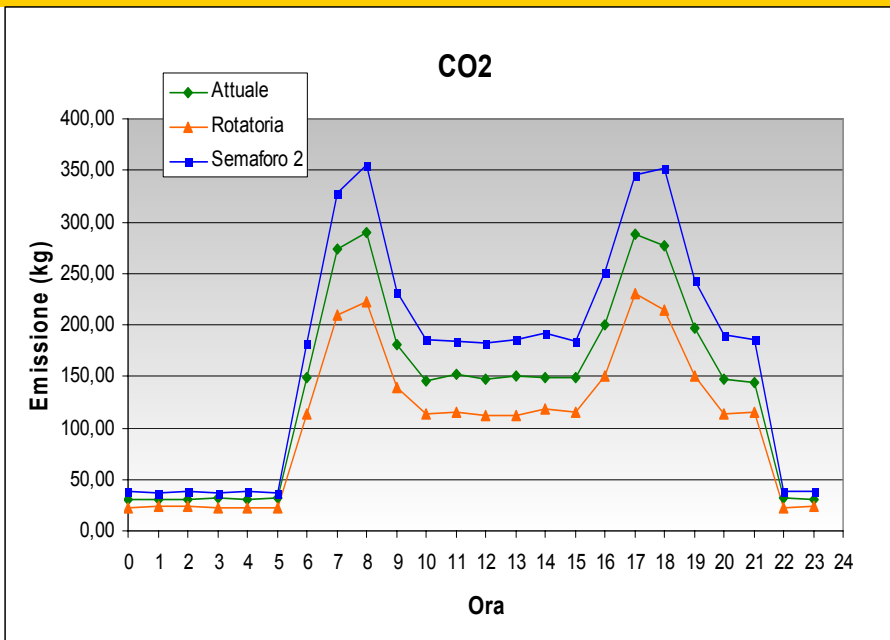
# Trasformazione dell'incrocio in rotatoria



## INTERSEZIONE SS1 – SS67 bis

### Analisi delle emissioni inquinanti nelle diverse soluzioni esaminate

EMISSIONI NEL GIORNO FERIALE TIPO	Emissioni (kg)		
	Attuale	Semafor o	Rotatoria
TOTALE CO <sub>2</sub> giorno	3.288	4.079	2.527
TOTALE CO giorno	169	263	180
TOTALE HC giorno	18	26	18
TOTALE NO <sub>x</sub> giorno	4,91	7,19	5,31
TOTALE Particolato giorno	0,85	0,94	0,79
TOTALE CO <sub>2</sub> equivalente giorno	5.004	6.625	4.373
CO <sub>2</sub> equiv. evitata in 1 anno	-	- 406 t	158 t
Particolato evitato in 1 anno	-	- 22 kg	15 kg



## Esempio n° 2

# LE TECNOLOGIE “*TIEPIDE*”

per la realizzazione della  
pavimentazione delle strade



Con il nome di **“Warm Mix Technologies”** (tecnologie “tiepide”) vengono chiamati i sistemi atti a ridurre la temperatura di produzione e di stesa del conglomerato bituminoso al fine di ridurre i consumi energetici e la produzione di fumi e sostanze inquinanti. 

Trattasi di mettere a punto miscele legate a bitume che, pur garantendo le prestazioni di resistenza e durabilità proprie delle tradizionali miscele a caldo, sono caratterizzate da una minore viscosità a temperature più basse.

Sono tecnologie sviluppate in Europa (particolarmente attiva in questo campo è la Germania) verso le quali al presente sono rivolte grandi attenzioni anche in Giappone e negli USA. 

## IMPIANTO DI PRODUZIONE DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO



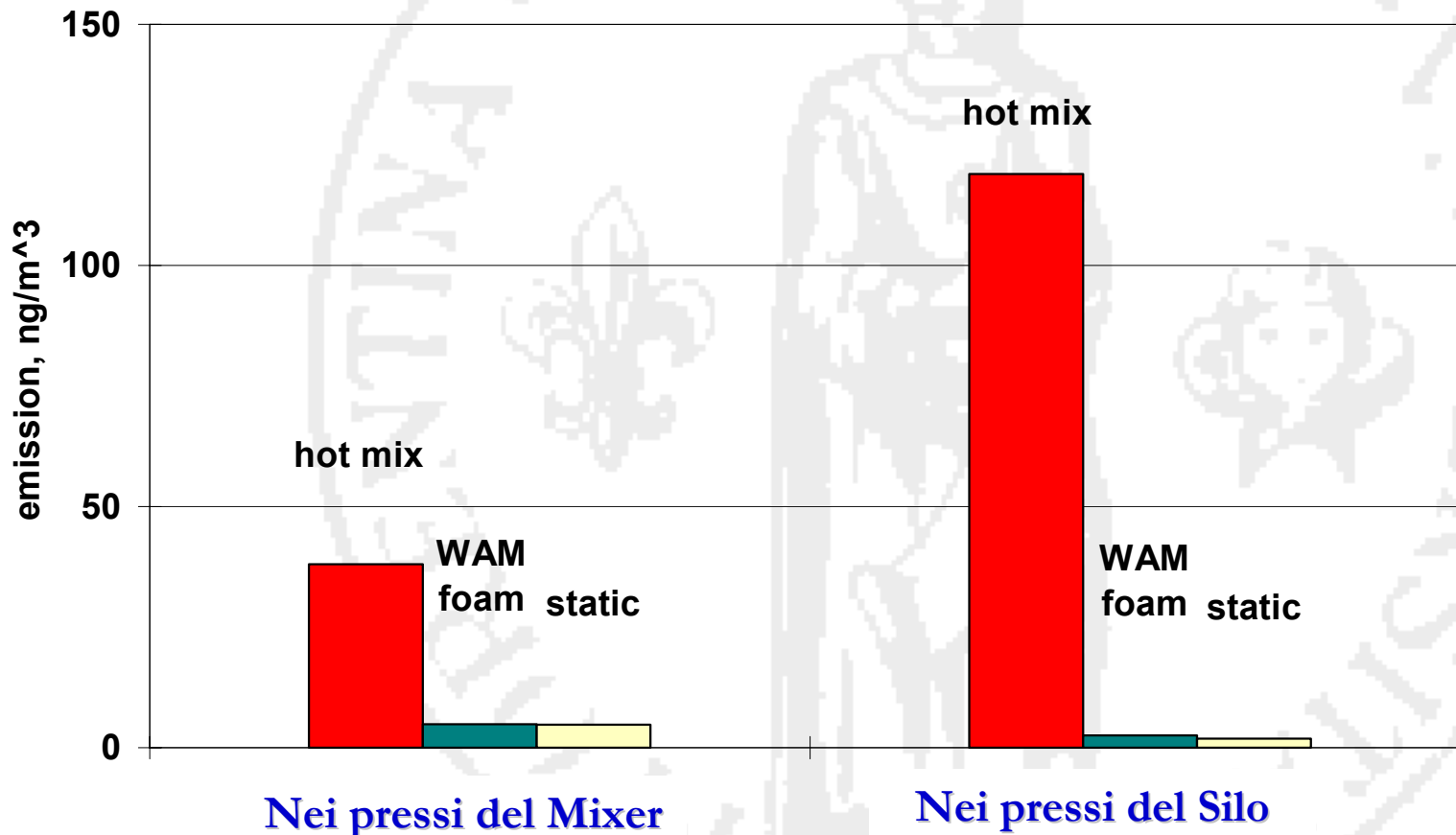
## STESA DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO



**Conglomerato  
tradizionale a caldo**

**Tecnologia “tiepida”**

## Profili di emissione di composti policiclici aromatici (PACs - Polycyclic Aromatic Compunds) durante la produzione delle miscele (\*)



(\*) Molti PACs hanno proprietà cancerogene riconosciute

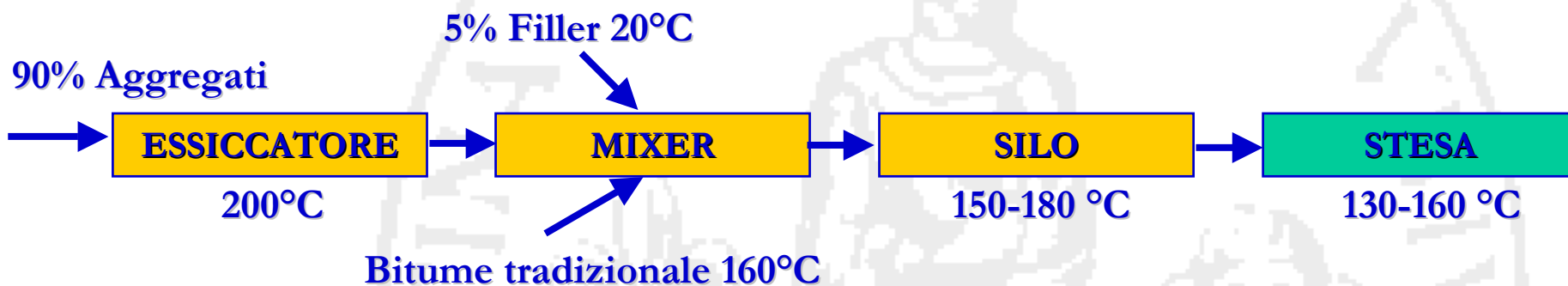


## TECNOLOGIE DISPONIBILI

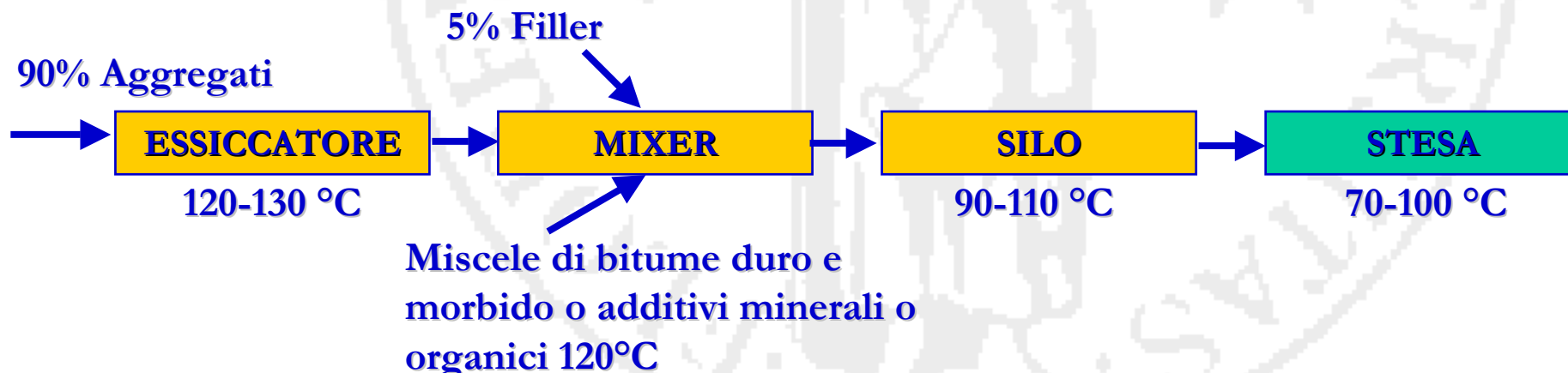
- Tecnologie che agiscono sul processo di produzione: **WAM-foam®**, prodotta dalla Shell International Petroleum (UK) e dalla Kolo Veidekke a.s. (Norvegia), commercializzata in Italia dalla Contech
- Tecnologie che impiegano additivi:
  - ✓ Minerali (a base di Zeoliti): **Aspha-Min®**, prodotto dalla Eurovia Services GmbH (Germania)
  - ✓ Organici (a base di cere paraffiniche o altri composti idrocarbinati ad alto peso molecolare):
    - **Sasobit®**, prodotto dalla Sasol Wax GmbH (Germania) con l'impiego di cere paraffiniche
    - **Asphaltan B®**, prodotto dalla Romonta GmbH (Germania)

## IL PROCESSO PRODUTTIVO

### Conglomerati a caldo tradizionali

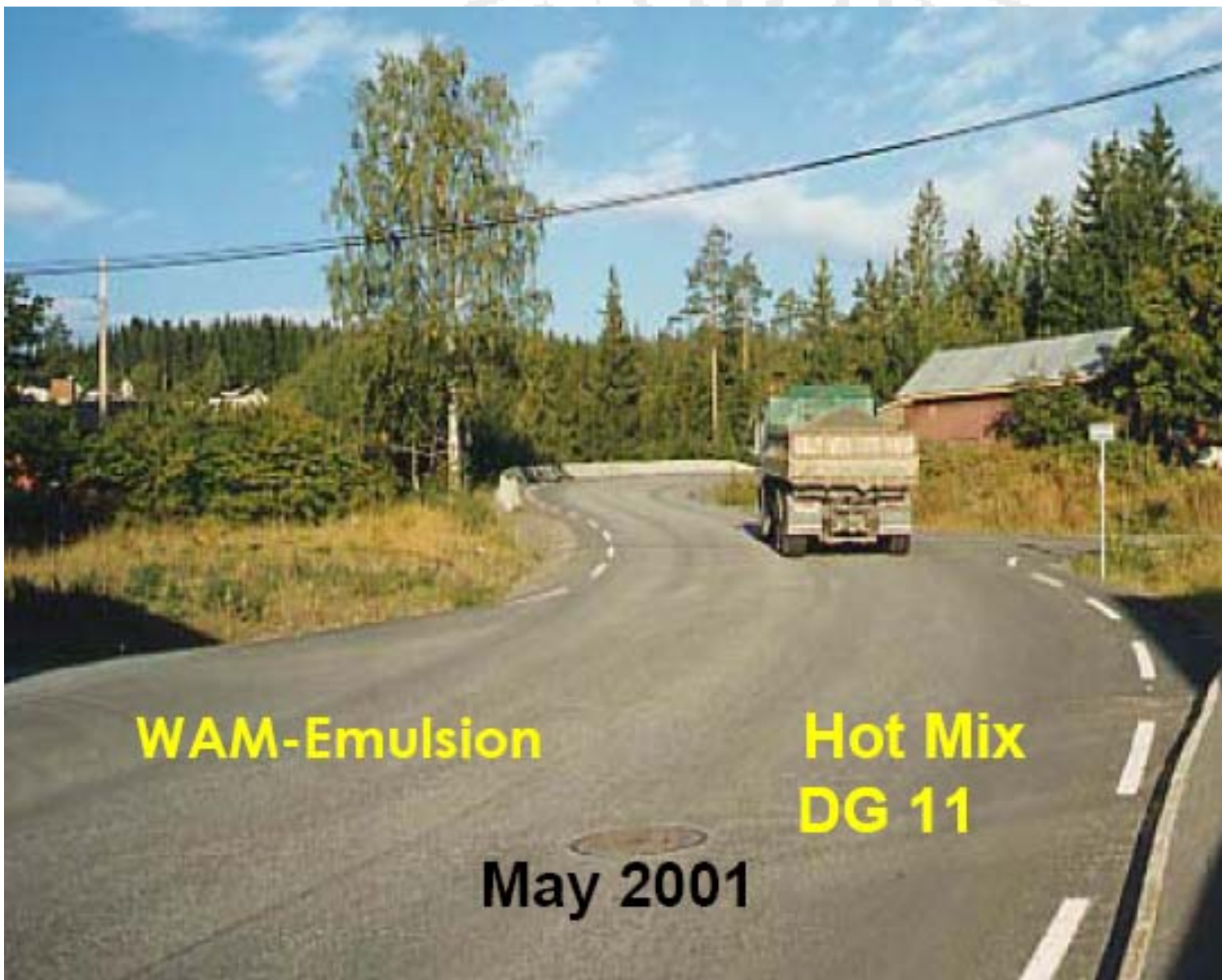


### Conglomerati "tiepidi"



## L'ECO-EFFICIENZA DELLE MISCELE “TIEPIDE”

- 40% in meno di emissioni di CO<sub>2</sub>, 30% in meno di CO, 60% in meno di NO<sub>x</sub> (*contributo agli obiettivi del protocollo di Kyoto*)
- 40-50% di risparmio energetico in produzione (*contributo al risparmio di energie non rinnovabili*)
- 50% in meno di emissioni di polveri e particolato
- Scomparsa di fumi e aromi odorosi (*tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori*)



**WAM-Emulsion**

**Hot Mix  
DG 11**

**May 2001**



## Esempio n° 3

# Gallerie autostradali e sistemi energetici, una possibile strategia di integrazione per migliorare l'impatto ambientale

*Progetto di ricerca in corso presso  
l'Università di Firenze*

**Prof. Ing. Ennio A. Carnevale (\*)**

**Prof. Ing. Lorenzo Domenichini (\*\*)**

**Ing. Lorenzo Ferrari (\*)**

*(\*) Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco" – Università di Firenze*

*(\*\*) Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Firenze*

# Introduzione

- Le gallerie favoriscono l'accumulo di sostanze inquinanti in aree geografiche molto ristrette.
- La ventilazione interna permette la diluizione degli inquinanti, ma non interviene sul loro abbattimento.
- Inasprimento delle normative sulle emissioni ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{VOC}$ , Particolato e Polveri).
- Inquinamento distribuito legato al consumo di energia elettrica prodotta, con basse efficienze, da combustibili fossili ( $\eta_{\text{ref}}=37\%$ ;  $0.531 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ )

# Introduzione

- **Sistemi energetici avanzati con emissioni compatibili con le restrizioni di impatto ambientale ed elevati rendimenti (impianti combinati turbina a gas e ciclo sottoposto a vapore).**
- **Le condizioni di combustione nella turbina a gas permettono un lavaggio termico dell'aria uscente dalla galleria.**
- **Ossidazione di CO, HC, VOC e Particolato (prevalentemente composto da residui carboniosi e prodotti dell'usura del manto stradale, dei freni e dei pneumatici).**

# Integrazione Galleria – Sist. Energ.

- Quando possibile, ubicare una turbina a gas con ciclo sottoposto in prossimità della bocca di una galleria potrebbe ridurre l'impatto ambientale del traffico.
- Gli inquinanti sono aspirati dal compressore del gruppo turbogas e le condizioni di temperatura raggiunte in camera di combustione permettono il lavaggio termico dell'aria

Progettazione strategica degli interventi antropici

# Possibile schema di integrazione

## TURBINA A GAS CON CICLO SOTTOFOSFO

Scarico in atmosfera dell'aria estratta dalla galleria disinquinata

HRSG

P

TV

TG

CC

C

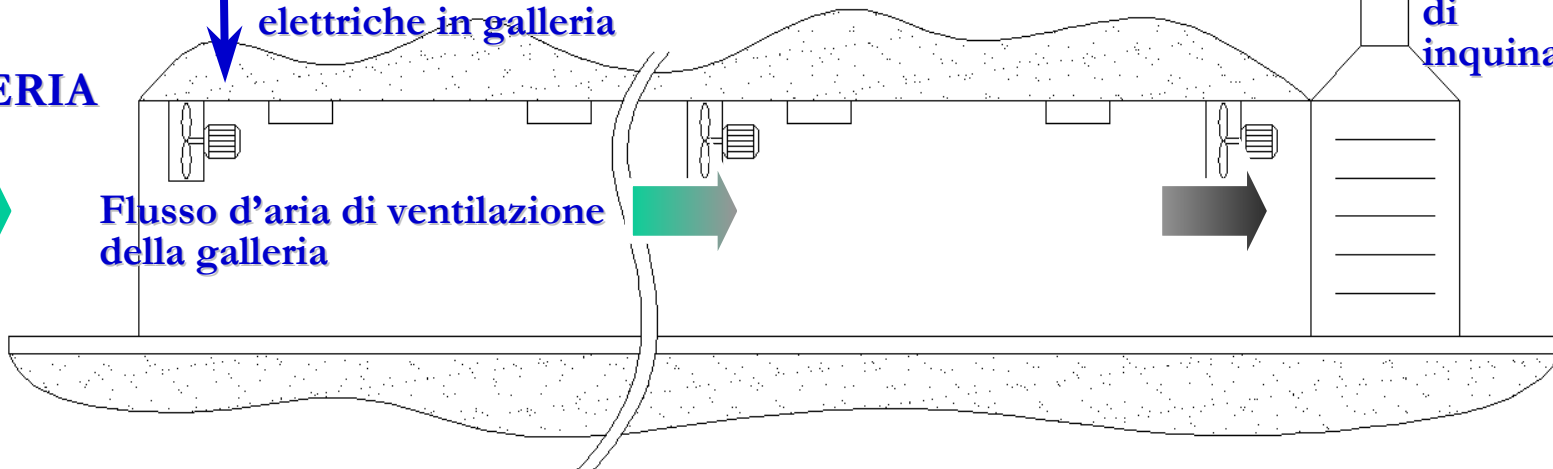
Aria viziata estratta dalla galleria con alto contenuto di inquinanti

Immissione nella rete ENEL

Alimentazione utenze elettriche in galleria

GALLERIA

Flusso d'aria di ventilazione della galleria



# Esempio di applicazione

- Galleria di base della Variante di Valico
  - Tipologia a doppia canna, ognuna di circa 9 km con 2 corsie più una di emergenza
  - Sezione frontale di ogni canna di circa 136 m<sup>2</sup>
  - Ventilazione ausiliaria mediante discenderia verticale a circa metà della lunghezza della canna
- Potenza elettrica installata
  - Totale: 7540 kW
    - Ventilazione e diluizione: 4680 kW
    - Illuminazione: 860 kW
    - Ausiliari: 2000 kW

# Volume di traffico stimato

- **Ipotesi di traffico**

- Traffico medio giornaliero per canna: 60600 veicoli
- Velocità media veicoli leggeri: 80 km/h
- Velocità media veicoli pesanti: 60 km/h
- Percentuale veicoli leggeri a benzina: 30%
- Percentuale veicoli leggeri diesel: 25%
- Percentuale veicoli pesanti: 45%

# Inquinamento stimato

- Emissioni annuali legati al traffico in galleria (2 canne):
  - CO<sub>2</sub> eq. 140.000 t
    - CO<sub>2</sub> 81.500 t
    - CO: 920 t
    - Idr. Incombusti (HC): 120 t
    - NO<sub>x</sub>: 210 t
    - Composti organici volatili (VOC): 80 t
  - Particolato: 520 t
- Mediante lavaggio termico è possibile intervenire su CO, HC, VOC e Particolato



# Sistema energetico avanzato

- Gruppo Turbogas: GE9132EC prodotto da G.E. e ciclo sottoposto a vapore
  - Potenza elettrica totale: 273 MW
    - Turbogas: 173 MW
    - Ciclo a vapore: 100 MW
  - Portata di aria in aspirazione: 429 m<sup>3</sup>/s
  - Fattore di emissione equivalente: 0.475 kg CO<sub>2eq</sub>/kWh<sub>el</sub>
- Anidride carbonica evitata grazie ad una produzione di energia elettrica più efficiente rispetto al mix italiano:
  - CO<sub>2eq</sub> evitata: 135.000 t

# Analisi di una canna

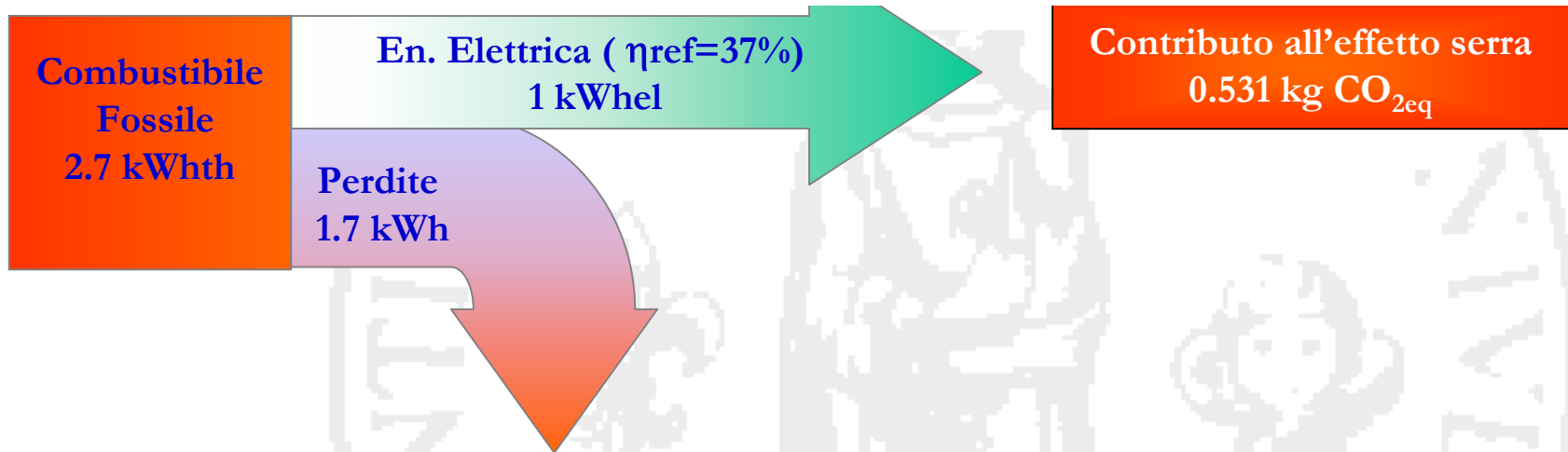
- Il traffico veicolare in condizioni normali di circolazione nel tunnel è sufficiente, per effetto pistone, a garantire il flusso di aria da portale a portale necessario a contenere le concentrazioni di inquinanti.
- Considerando una sola canna della galleria, le emissioni sono diluite in una portata d'aria che mediamente può essere considerata di circa 410 m<sup>3</sup>/s, considerando il valore della sezione frontale e la velocità media dell'aria di circa 3 m/s.

# Portata trattata

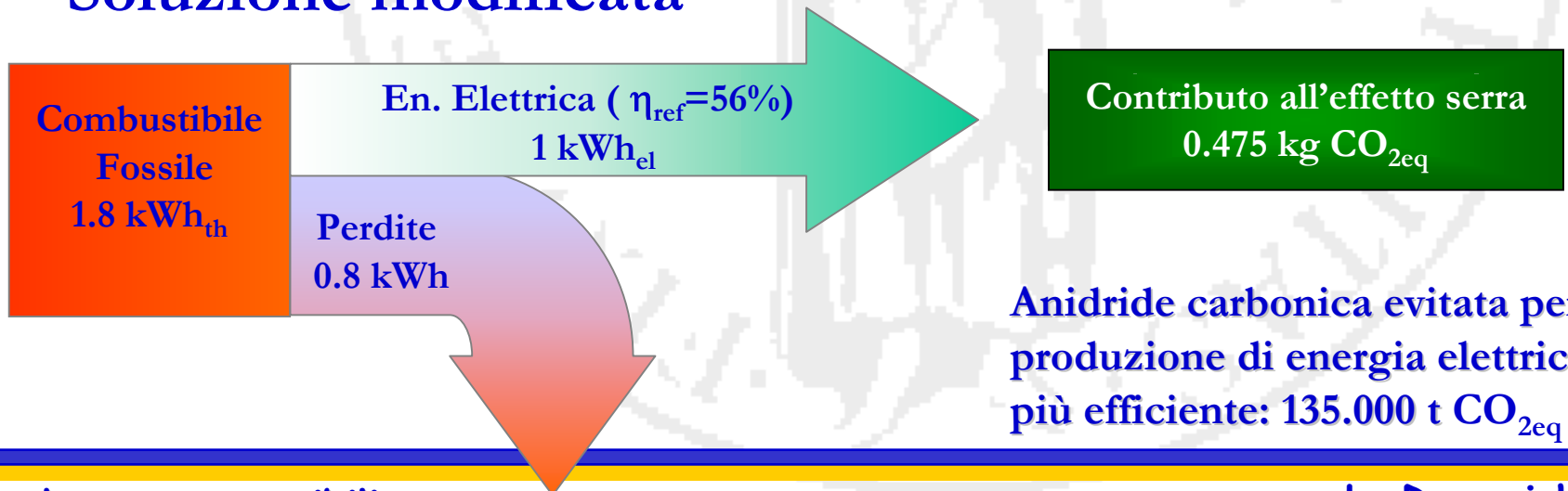
- La portata di diluizione di una canna può essere interamente aspirata dalla turbina a gas e subire il lavaggio termico.
- Emissioni evitate:
  - CO<sub>2eq</sub> evitata: 1.215 t
    - CO: 460 t
    - Idrocarburi Incombusti (HC): 59 t
    - Composti organici volatili (VOC): 39 t
  - Particolato: 257 t

# Confronto prod. energia elettrica

- Soluzione esistente

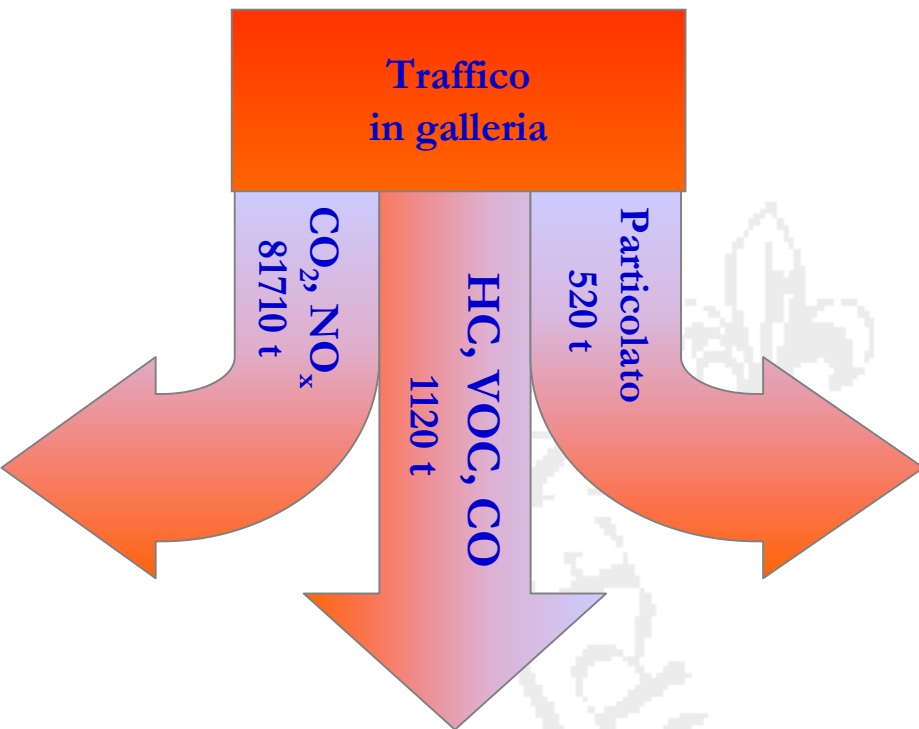


- Soluzione modificata

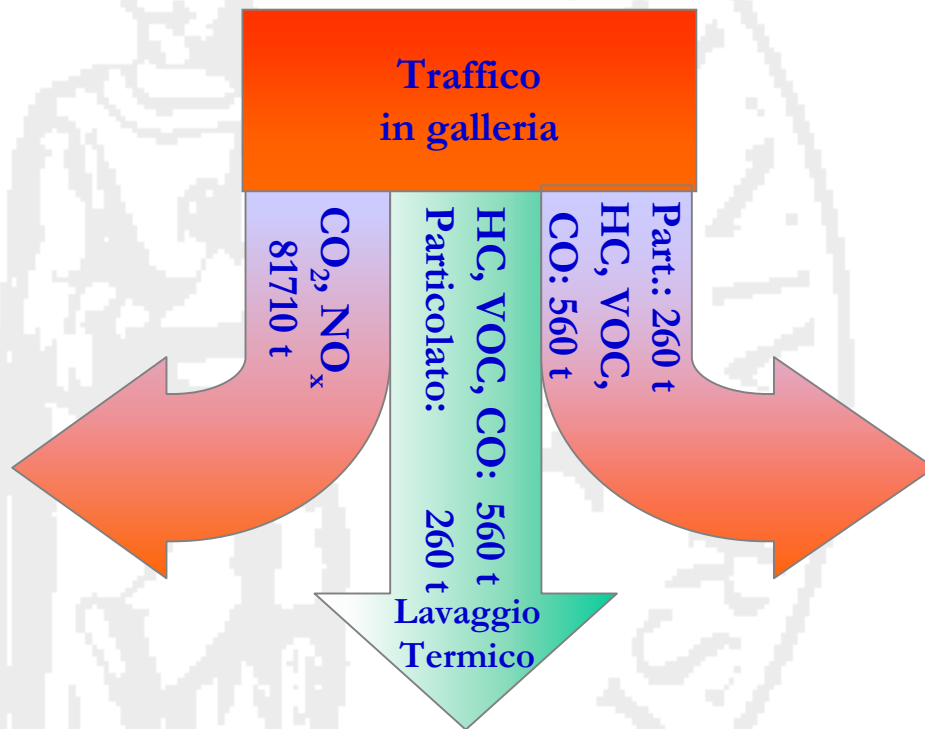


# Confronto inquinamento localizzato

- Soluzione esistente
- Soluzione modificata



**Contributo complessivo all'effetto serra 140.000 t CO<sub>2eq</sub> (2500 t CO<sub>2eq</sub> da CO, HC, VOC)**



**Gas clima-alteranti evitati: 1225 t CO<sub>2eq</sub>**  
**Particolato evitato: 260 t**

# Conclusioni

- Produzione di energia elettrica mediante sistemi ad alta efficienza integrati con l'abbattimento di alcune delle sostanze inquinanti prodotte dal traffico
- La soluzione integrata proposta, apre una prospettiva di progettazione strategica degli interventi antropici mirata all'ottimizzazione combinata sia degli aspetti energetici che di quelli ambientali
- Possibili sviluppi concettuali considerando la cogenerazione termica con utenze prossime all'installazione