"Riqualificazione energetica sostenibile di un edificio scolastico del 1970"

Scelte tecnologiche per l'intervento sull'involucro ottimizzate attraverso l'analisi del ciclo di vita (LCA) e valutazione delle prestazioni energetiche ed economiche

LAUREANDA

Edith Colomba

RELATORE

Prof. Ing. Fabio Peron

CORRELATORI

Prof. Arch. Ernesto Antonini
Ing. Paolo Neri (ENEA)

"Riqualificazione energetica sostenibile di un edificio scolastico del 1970"

Scelte tecnologiche per l'intervento sull'involucro ottimizzate attraverso l'analisi del ciclo di vita (LCA) e valutazione delle prestazioni energetiche ed economiche

LAUREANDA

Edith Colomba

RELATORE

Prof. Ing. Fabio Peron

CORRELATORI

Prof. Arch. Ernesto Antonini
Ing. Paolo Neri (ENEA)

Intro

Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica

Fattibilità economica

Caso studio

Sostenibilità di una riqualificazione

SOSTENIBILITÀ = minore impatto ambientale

↓

minore consumo energetico dell'edificio

↓

migliori prestazioni edificio-impianto

↓

Materiali | Energia

Percorso progettuale della tesi

riqualificazione energetica

↓

nuove prestazioni termiche dell'involucro

↓

muratura di tamponamento | solaio superiore solaio a terra serramenti

↓

3 alternative tecnologiche

↓

ANALISI LCA → SCELTA → prestazioni energetiche economiche

Sostenibilità di una riqualificazione

SOSTENIBILITÀ = minore impatto ambientale

↓

minore consumo energetico dell'edificio

↓

migliori prestazioni edificio-impianto

↓

Materiali | Energia

Percorso progettuale della tesi

riqualificazione energetica

↓

nuove prestazioni termiche dell'involucro

↓

muratura di tamponamento | solaio superiore solaio a terra serramenti

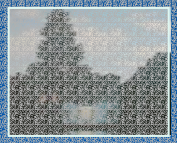
↓

3 alternative tecnologiche

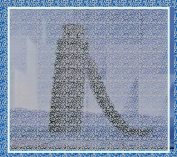
↓

ANALISI LCA → SCELTA → prestazioni termiche economiche

Life-Cycle Assessment



Efficienza energetica



Fattibilità economica

Caso studio

Cos'è l'analisi LCA

La valutazione ambientale deve essere compiuta nel *CICLO DI VITA* del prodotto o processo

La metodologia *Life-Cycle Assessment* si occupa della valutazione ambientale di qualsiasi prodotto o processo nel corso del suo ciclo di vita

L'analisi riguarda l'intero ciclo di vita del processo o attività dall'estrazione e trattamento delle materie prime, alla produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, al suo uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e alla collocazione finale del prodotto dopo l'uso, dalla culla alla tomba

SETAC
(*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993)

La metodologia LCA

Obiettivo,
Unità funzionale,
Confini del sistema
ISO 14041

INPUT
materiali,
processi,risorse

Inventario
ISO 14041

OUTPUT
Materiali, emissioni
acqua, aria e suolo

Valutazione del danno ambientale
ISO 14042
Metodi ECO-INDICATOR 99, EPS 2000 e EDIP 96….

CLASSIFICAZIONE → **CARATTERIZZAZIONE** → **NORMALIZZAZIONE** → **VALUTAZIONE**

Analisi di sensibilità
Valutazione dei miglioramenti
ISO 14043

Strumenti di analisi LCA nel mondo

Analisi del singolo prodotto	SimaPro (NL) Boustead(UK) BEES (USA)… Analisi LCA specifico per singoli processi Database molto dettagliato
Analisi del sistema complesso (edificio)	Athena (CA) GBTool (UK) Ecopro (D) … Analisi LCA di interi edifici Database semplificato
Valutazione ambientale attraverso checklist	ITACA (I) BREEAM (UK) LEED (USA) Sistemi per punti di merito in categorie di sostenibilità

Il Software SimaPro 5.0

Banche dati

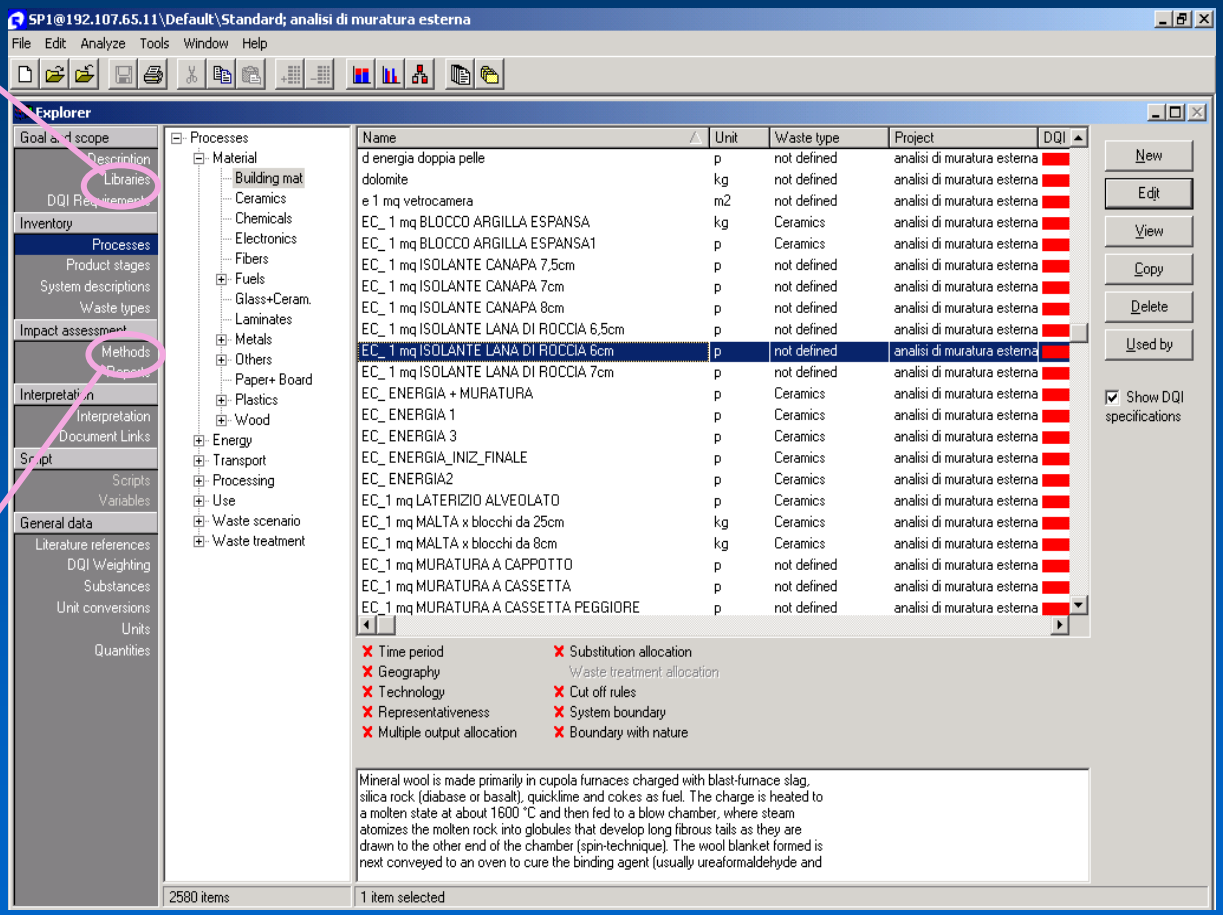
PRE-Standard
ETH-ESU 96
IDEMAT 2001
Industry Data
IVAM
Ecoinvent

Modifiche ENEA

Metodi

Eco-Indicator 99
EPS 2000
EDIP 96

Modifiche ENEA



Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica

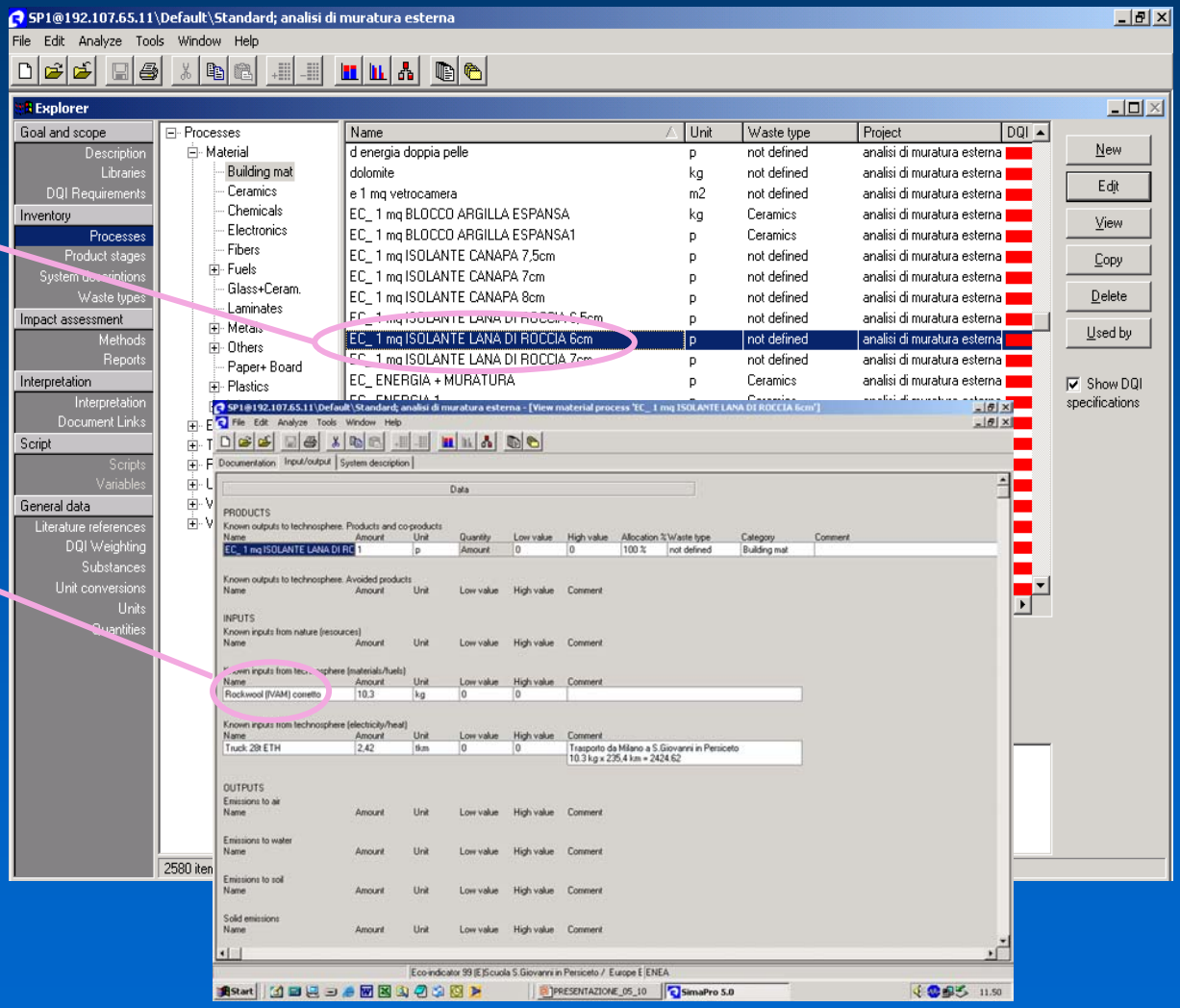
Fattibilità economica

Caso studio

Il Software SimaPro 5.0

Processo studiato

Sottoprocesso



Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica

Fattibilità economica

Caso studio

Categorie di danno e impatto nei tre metodi

Eco-Indicator 99

Salute umana [DALY]

Sostanze cancerogene
Effetti sull'apparato respiratorio
Cambiamenti climatici
Impoverimento strato di ozono
Radiazioni

Qualità dell'ecosistema [PDF*m^2*yr]

Acidificazione / eutrofizzazione
Ecotossicità
Uso del territorio

Uso delle risorse [MJ Surplus]

Minerali
Combustibili fossili

EPS 2000

Salute umana [YOLL, Person year]

Aspettativa di vita
Malattia grave
Malattia
Disturbi gravi
Disturbi

Capacità produttiva dell'ecosistema [kg o H+eq]

Capacità di crescita dei cereali
Capacità di crescita del legno
Produzione di pesce e bestiame
Acidificazione del suolo
Sottrazione di acqua per irrigare
Sottrazione di acqua all'uso potabile

Risorse abiotiche [ELU]

Impoverimento delle risorse

Biodiversità [NEX]

Estinzione delle specie

EDIP 96

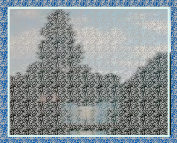
Categorie di impatto [g,m^3,kg]

Surriscaldamento globale
Impoverimento dello strato di Ozono
Acidificazione
Eutrofizzazione
Smog fotochimico
Ecotossicità cronica dell'acqua
Ecotossicità acuta dell'acqua
Ecotoxicity cronica del suolo
Tossicità dell'aria per l'uomo
Tossicità dell'acqua per l'uomo
Tossicità del suolo per l'uomo
Rifiuti indifferenziati
Rifiuti
Rifiuti radioattivi

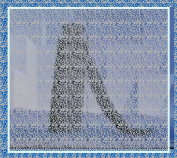
Uso delle risorse [kg]

Tutte le risorse

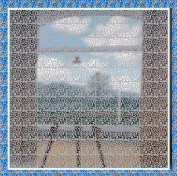
Life-Cycle Assessment



Efficienza energetica



Fattibilità economica



Caso studio

Valutazione di impatto con i tre metodi

Eco-Indicator 99

Caratterizzazione

- DALY
- PDFm2yr
- MJSurplus

Normalizzazione Valutazione

ECO-PUNTI (Pt)

Si riferisce all'area europea

Forte caratterizzazione Dell'uso del territorio

Valutazione secondo prospettive culturali

EPS 2000

Caratterizzazione

- Yoll Pyr
- Kg o H+
- ELU
- NEX

Valutazione

ECO-PUNTI (ELU=Pt=EURO)

Forte caratterizzazione dell'uso dell'acqua

Valutazione anche dei costi esterni

EDIP 96

Caratterizzazione

- g sost.
- m^3
- kg

Normalizzazione Valutazione

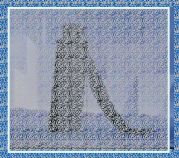
ECO-PUNTI (Pt)

Non considera Uso del territorio e polveri sottili

Minore valutazione delle risorse

Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica



Fattibilità economica

Caso studio

Dichiarazioni ambientali di prodotto
EPD

EPD
Environmental Product declaration
Certificazione di qualità ambientale del prodotto
MODELLO SVEDESE

↓

ISO TR 14025

↓

ANPA
Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

↓

Linee guida per per la dichiarazione ambientale di prodotto, 2001

PSR
Product Specific Requirements
Requisiti specifici di prodotto

→

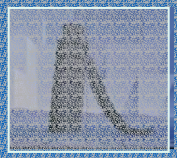
ANALISI LCA
del prodotto

→

Controllo da parte di organismi di accreditamento e ANPA

→

EPD®



Dichiarazioni ambientali di prodotto
EPD

EPD
Environmental Product declaration
Certificazione di qualità ambientale del prodotto
MODELLO SVEDESE

↓

ISO TR 14025

↓

ANPA
Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

↓

***Linee guida per per la dichiarazione ambientale di prodotto*, 2001**

PSR
Product Specific Requirements
Requisiti specifici di prodotto

→

ANALISI LCA
del prodotto

→

Controllo da parte di organismi di accreditamento e ANPA

→

EPD®

Efficienza energetica degli edifici

In Europa
il campo dell'edilizia costituisce 1/3
della spesa energetica complessiva

Normativa Italiana

1976 → Legge 30 aprile 1976 n. 373 → **Involucro** Cd_{lim} W/m^3K

1991 → Legge 9 gennaio 1991 n. 10 → **Sistema edificio-impianto** Cd_{lim} FEN_{lim} h_{lim}

Normativa Comunitaria

1993 → Direttiva 93/76/CE

2002 → Direttiva 2002/91/CE

→ **Certificazione energetica**

Esperienze di certificazione energetica degli edifici in Italia

CASACLIMA
Bolzano

Bassi consumi — KWh/m²a

A	≤ 30
B	≤ 50
C	≤ 70
D	≤ 90
E	≤ 120
F	≤ 160
G	> 160

Alti consumi

CARUGATE
Regione Lombardia

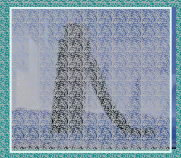
Bassi consumi — KWh/m²a

A	≤ 35
B	35-50
C	50-75
D	75-100
E	100-125
F	125-150
G	150-175
H	175-200
I	> 200

Alti consumi

Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica

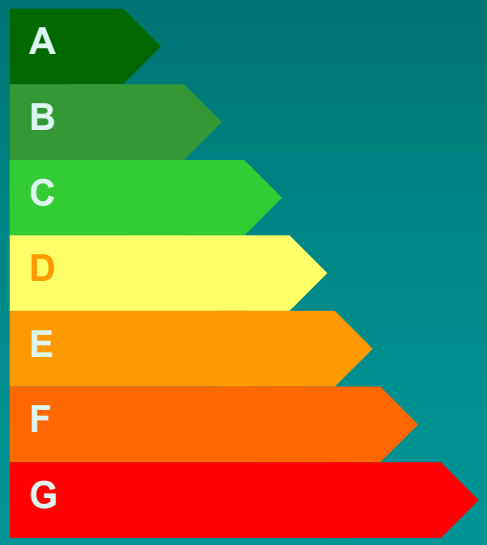

Fattibilità economica

Caso studio

Esperienze di certificazione energetica degli edifici in Italia

CASACLIMA
Bolzano

Bassi consumi

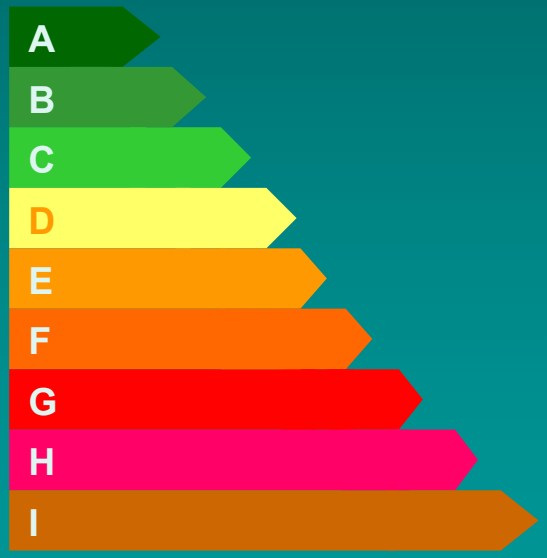


Alti consumi

KWh/m²a
≤ 30
≤ 50
≤ 70
≤ 90
≤ 120
≤ 160
> 160

CARUGATE
Regione Lombardia

Bassi consumi

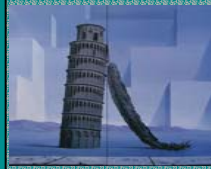


Alti consumi

KWh/m²a
≤ 35
35-50
50-75
75-100
100-125
125-150
150-175
175-200
> 200

Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica


Fattibilità economica

Caso studio

Prestazioni economiche degli interventi di riqualificazione

COSTI INTERNI

Stima dei costi di intervento → $Ct = \sum (Qi*Pi)$

Stima del Valore Attuale netto (VAN) →

$$VAN = -I + \frac{(R_1-C_1)}{f_1} + \frac{(R_2-C_2)}{f_2} + \dots + \frac{(R_n-C_n)}{f_n}$$

Tempo di ritorno semplice (TRS) → Costo investimento/ flusso cassa

Tempo di ritorno attualizzato (TRA) →

$$VAN = -I + \frac{(R_1-C_1)}{f_1} + \frac{(R_2-C_2)}{f_2} + \dots + \frac{(R_n-C_n)}{f_n} = 0$$

COSTI ESTERNI

Metodo EPS 2000 → VALUTAZIONE IN Pt=ELU=€

Metodo Eco-Indicator 99 → Calcolo e confronto con EPS

Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica

Fattibilità economica

Caso studio

Prestazioni economiche degli interventi di riqualificazione

COSTI INTERNI

Stima dei costi di intervento → $Ct = \sum (Qi*Pi)$

Stima del Valore Attuale netto (VAN) → $VAN = -I + \frac{(R_1-C_1)}{f_1} + \frac{(R_2-C_2)}{f_2} + \dots + \frac{(R_n-C_n)}{f_n}$

Tempo di ritorno semplice (TRS) → Costo investimento/ flusso cassa

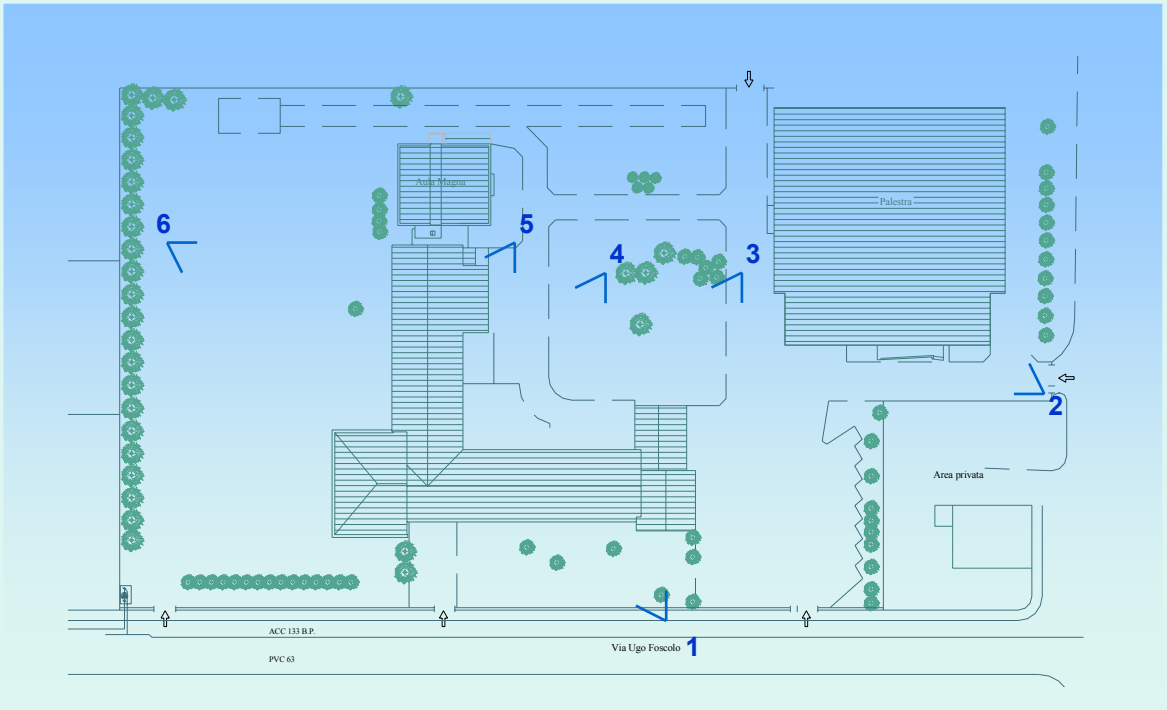
Tempo di ritorno attualizzato (TRA) → $VAN = -I + \frac{(R_1-C_1)}{f_1} + \frac{(R_2-C_2)}{f_2} + \dots + \frac{(R_n-C_n)}{f_n} = 0$

COSTI ESTERNI

Metodo EPS 2000 → VALUTAZIONE IN Pt=ELU=€

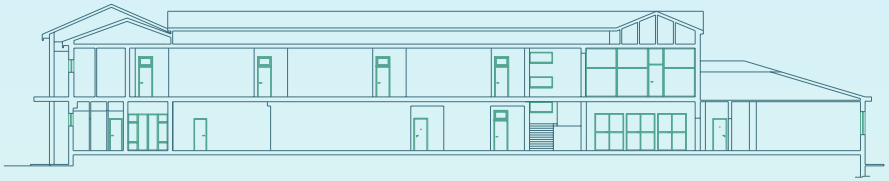
Metodo Eco-Indicator 99 → Calcolo e confronto con EPS

Scuola media "Francesco Mezzacasa"
S.Giovanni in Persiceto (BO)

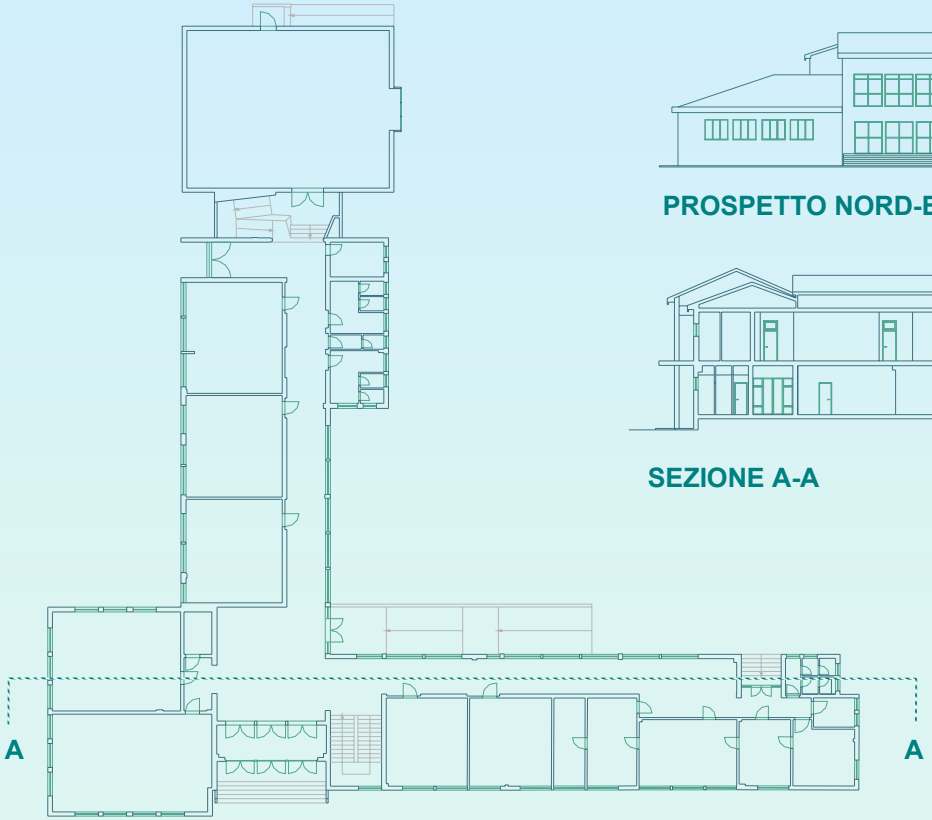


Scuola elementare "S.Matteo della Decima"
S.Giovanni in Persiceto (BO)

PROSPETTO NORD-EST



SEZIONE A-A



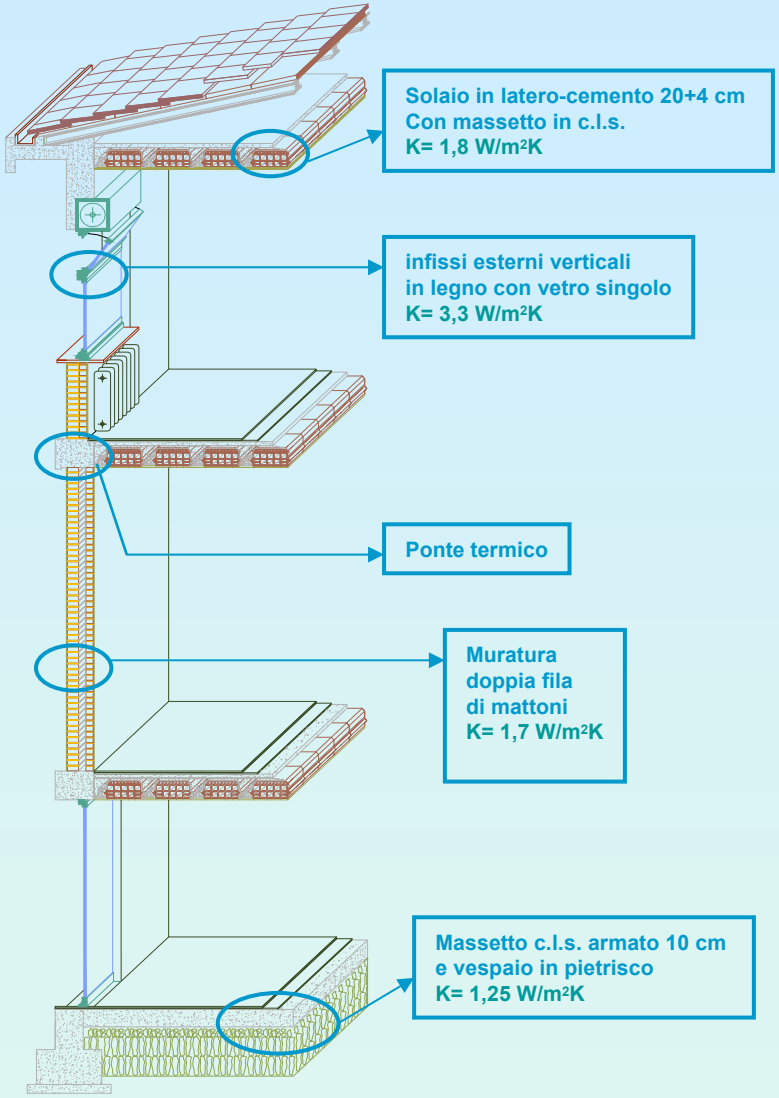
Struttura: telaio in c.l.s. armato con muratura di tamponamento doppia fila di mattoni con intercapedine.

Impianto: sostituito nel 2001

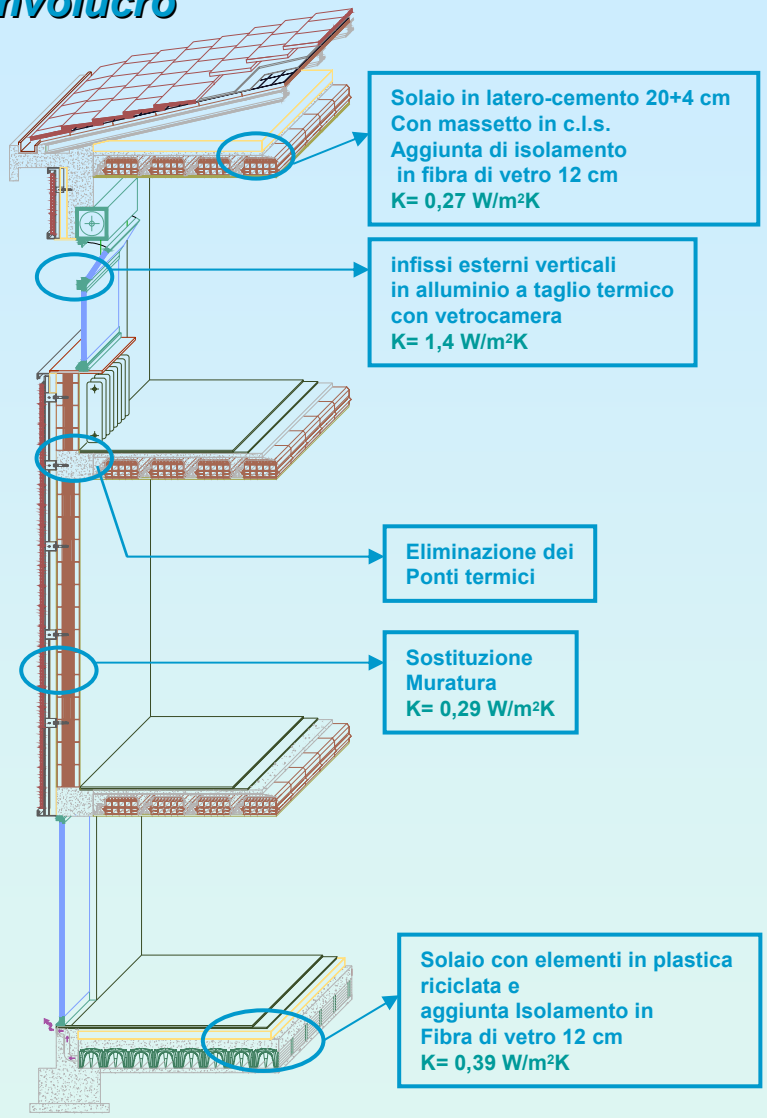
Volume = 37746,5 m^3

Superficie muratura di tamponamento = 1150 m^2

Interventi sull'involucro

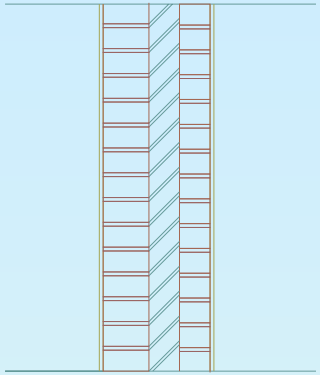


Stato di fatto



Progetto

Alternative per la sostituzione della muratura di tamponamento

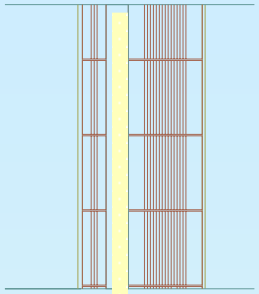


Muratura nello stato di fatto
K= 1,7 W/m²K

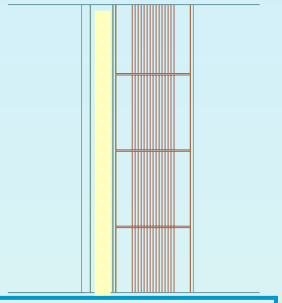
Tutte le ipotesi:
K= 0,29 W/m²K

UNITÀ FUNZIONALE
1m² di muratura

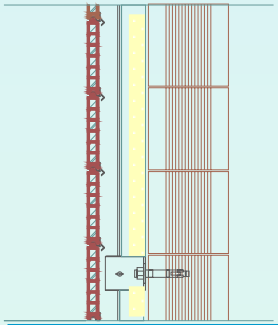
cassetta	Laterizio	1	EPS
		2	Fibre di vetro
		3	Poliuretano espanso
		4	Lana di roccia
		5	Fibra di canapa
	Argilla esp.	6	EPS
		7	Fibre di vetro
		8	Poliuretano espanso
		9	Lana di roccia
		10	Fibra di canapa
cappotto	Laterizio	11	EPS
		12	Fibre di vetro
		13	Poliuretano espanso
		14	Lana di roccia
		15	Fibra di canapa
	Argilla esp.	16	EPS
		17	Fibre di vetro
		18	Poliuretano espanso
		19	Lana di roccia
		20	Fibra di canapa
ventilata	Laterizio	21	EPS
		22	Fibre di vetro
		23	Poliuretano espanso
		24	Lana di roccia
		25	Fibra di canapa
	Argilla esp.	26	EPS
		27	Fibre di vetro
		28	Poliuretano espanso
		29	Lana di roccia
		30	Fibra di canapa



Ipotesi muratura a cassetta

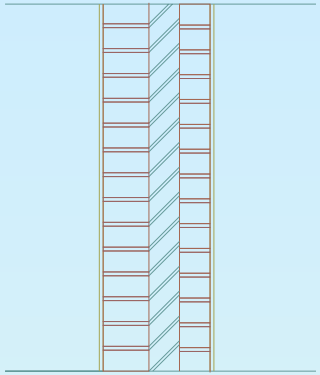


Ipotesi muratura a cappotto



Ipotesi parete ventilata

Alternative per la sostituzione della muratura di tamponamento

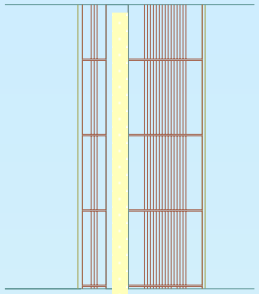


Muratura nello stato di fatto
K= 1,7 W/m²K

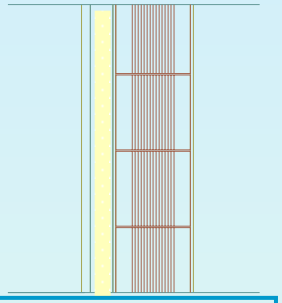
Tutte le ipotesi:
K= 0,29 W/m²K

UNITÀ FUNZIONALE
1m² di muratura

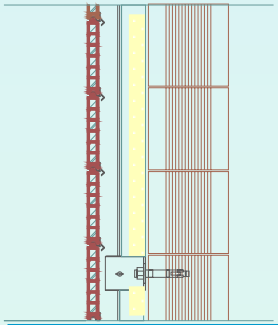
cassetta	Laterizio	1	EPS
		2	Fibre di vetro
		3	Poliuretano espanso
		4	Lana di roccia
		5	Fibra di canapa
	Argilla esp.	6	EPS
		7	Fibre di vetro
		8	Poliuretano espanso
		9	Lana di roccia
		10	Fibra di canapa
cappotto	Laterizio	11	EPS
		12	Fibre di vetro
		13	Poliuretano espanso
		14	Lana di roccia
		15	Fibra di canapa
	Argilla esp.	16	EPS
		17	Fibre di vetro
		18	Poliuretano espanso
		19	Lana di roccia
		20	Fibra di canapa
ventilata	Laterizio	21	EPS
		22	Fibre di vetro
		23	Poliuretano espanso
		24	Lana di roccia
		25	Fibra di canapa
	Argilla esp.	26	EPS
		27	Fibre di vetro
		28	Poliuretano espanso
		29	Lana di roccia
		30	Fibra di canapa



Ipotesi muratura a cassetta

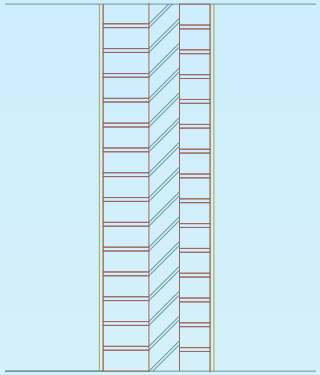


Ipotesi muratura a cappotto



Ipotesi parete ventilata

Alternative per la sostituzione della muratura di tamponamento

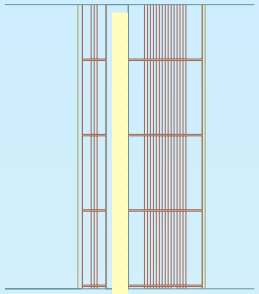


Muratura nello stato di fatto
K= 1,7 W/m²K

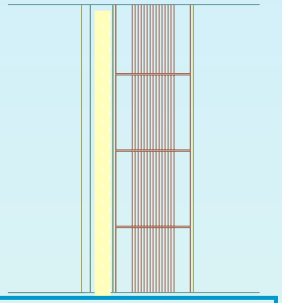
Tutte le ipotesi:
K= 0,29 W/m²K

UNITÀ FUNZIONALE
1m² di muratura

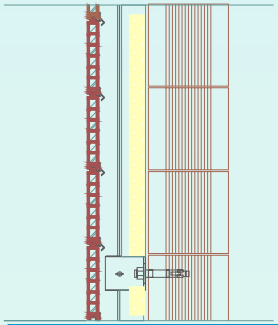
cassetta	Laterizio	1	EPS
		2	Fibre di vetro
		3	Poliuretano espanso
		4	Lana di roccia
		5	Fibra di canapa
	Argilla esp.	6	EPS
		7	Fibre di vetro
		8	Poliuretano espanso
		9	Lana di roccia
		10	Fibra di canapa
cappotto	Laterizio	11	EPS
		12	Fibre di vetro
		13	Poliuretano espanso
		14	Lana di roccia
		15	Fibra di canapa
	Argilla esp.	16	EPS
		17	Fibre di vetro
		18	Poliuretano espanso
		19	Lana di roccia
		20	Fibra di canapa
ventilata	Laterizio	21	EPS
		22	Fibre di vetro
		23	Poliuretano espanso
		24	Lana di roccia
		25	Fibra di canapa
	Argilla esp.	26	EPS
		27	Fibre di vetro
		28	Poliuretano espanso
		29	Lana di roccia
		30	Fibra di canapa



Ipotesi muratura a cassetta



Ipotesi muratura a cappotto

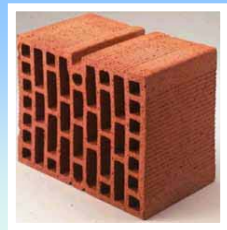


Ipotesi parete ventilata

Analisi LCA per la scelta del blocco

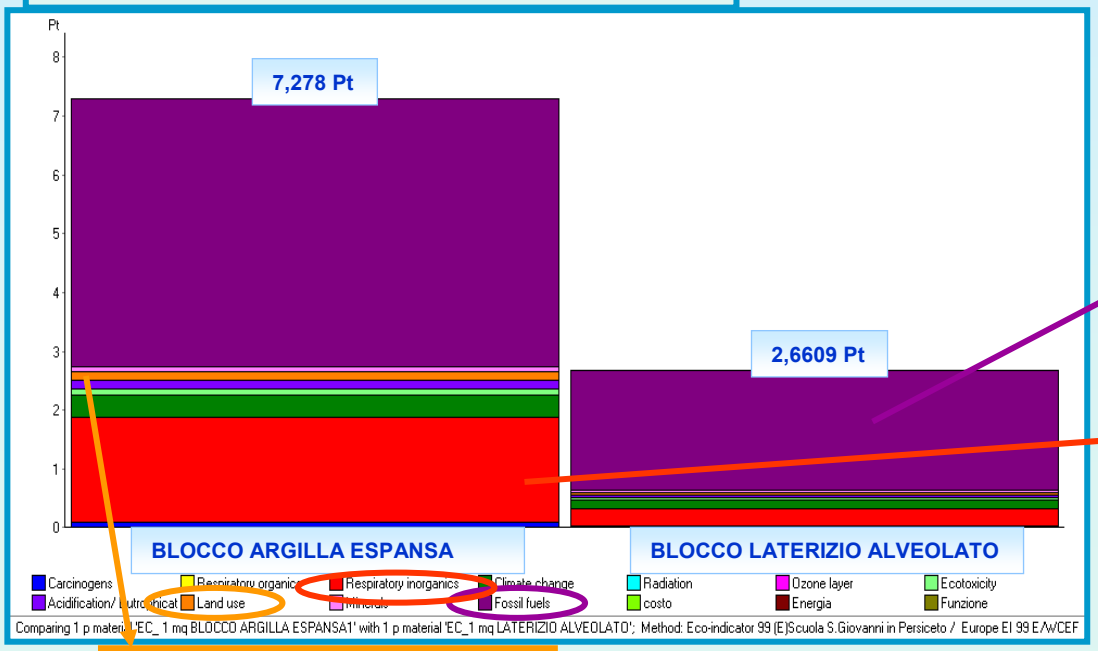
Inventario

Blocco argilla espansa



Blocco laterizio alveolato
(DATI da Azienda)

Valutazione con Eco-Indicator 99



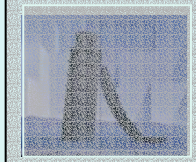
Risorse: minore consumo di combustibili fossili

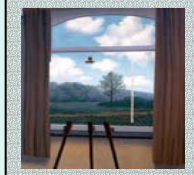
Salute umana: Maggiore emissione di polveri sottili a causa della produzione di cemento Portland

Qualità ecosistema: Maggiore uso del suolo

Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica

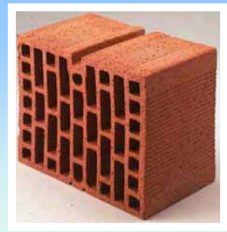

Fattibilità economica


Caso studio

Analisi LCA per la scelta del blocco

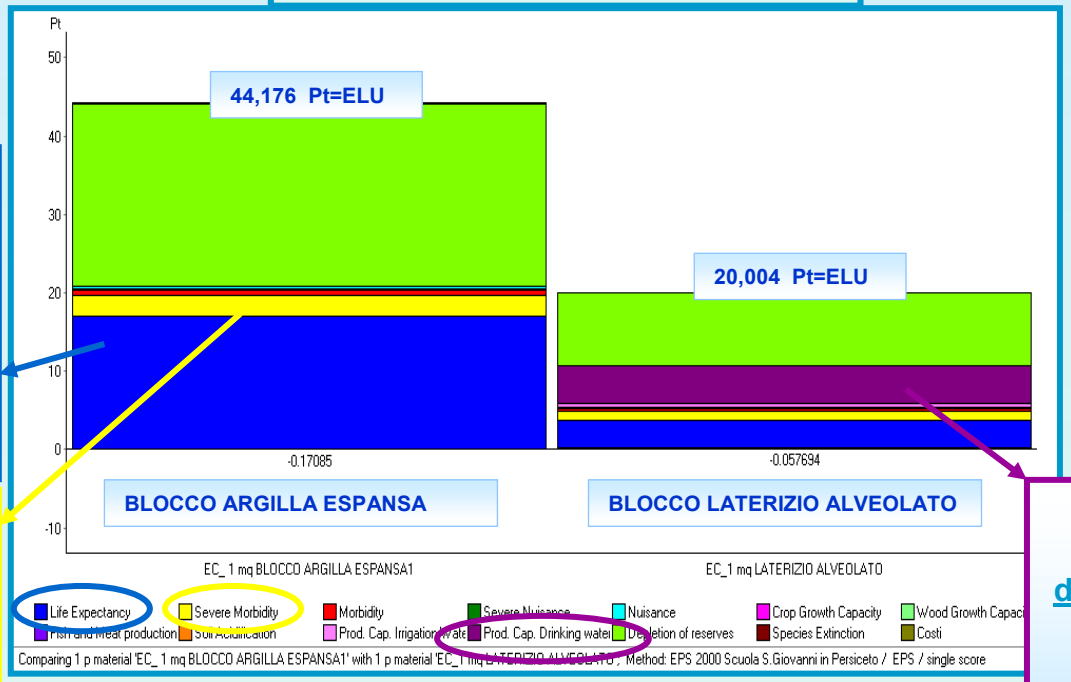
Inventario

Blocco argilla espansa



Blocco laterizio alveolato
(DATI da Azienda)

Valutazione con EPS 2000



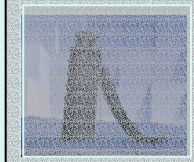
Salute umana: Maggiore emissione di polveri sottili a causa della produzione di cemento Portland

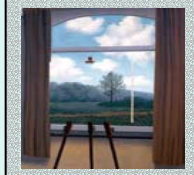
Salute umana: Maggiore emissione di CO_2 nella produzione di argilla espansa

Capacità produttiva dell'ecosistema: Maggiore uso dell'acqua nell'impasto dei mattoni

Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica

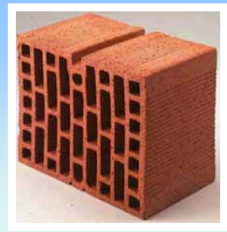

Fattibilità economica


Caso studio

Analisi LCA per la scelta del blocco

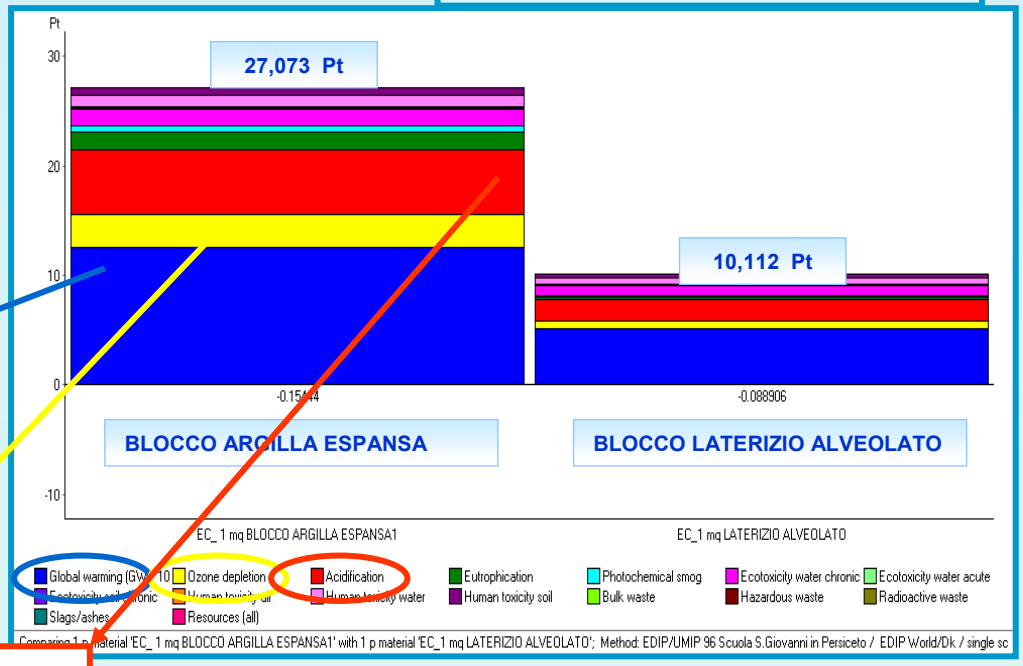
Inventario

Blocco argilla espansa



Blocco laterizio alveolato
(DATI da Azienda)

Valutazione con EDIP 96



Riscaldamento globale: Maggiore emissione di CO2 nella produzione di argilla espansa

Impoverim. strato ozono: Maggiore emissione di Halon nei trasporti

Acidificazione: Maggiore emissione di SO2 nella produzione di argilla espansa

Scelta → Laterizio alveolato

Analisi LCA per la scelta dell'isolante con Eco-Indicator 99

Inventario

Fibra di Canapa
(DATI da Azienda)

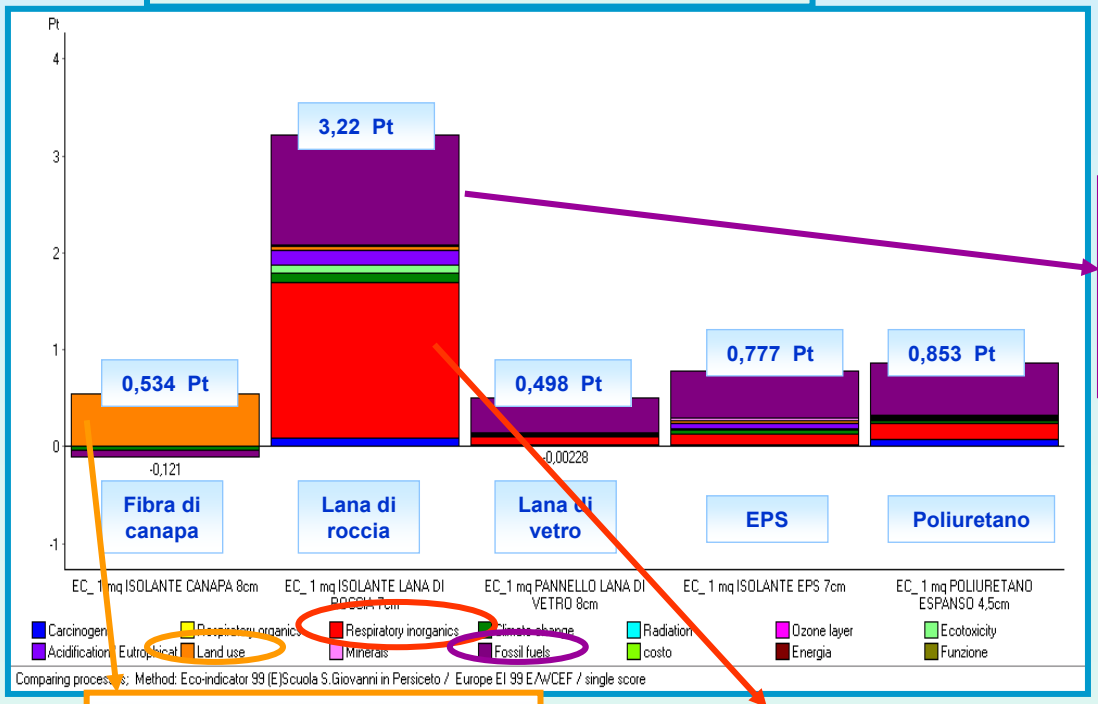
Lana roccia
(DATI da Azienda)

Fibra vetro

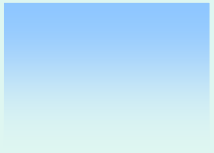
Polistirene espanso sintetizzato (EPS)

Poliuretano espanso

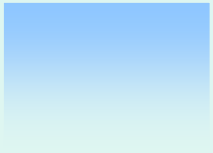
Isolanti nella muratura a cassetta



cappotto



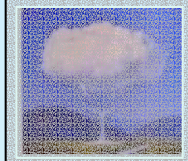
ventilata



Risorse: maggiore consumo di combustibili fossili

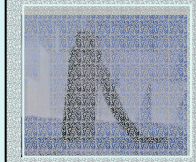
Qualità ecosistema: grande uso del suolo

Salute umana: grande emissione di polveri sottili

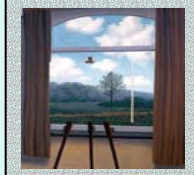


Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica



Fattibilità economica



Caso studio

Analisi LCA per la scelta dell'isolante con Eco-Indicator 99

Inventario

Fibra di Canapa
(DATI da Azienda)

Lana roccia
(DATI da Azienda)

Fibra vetro

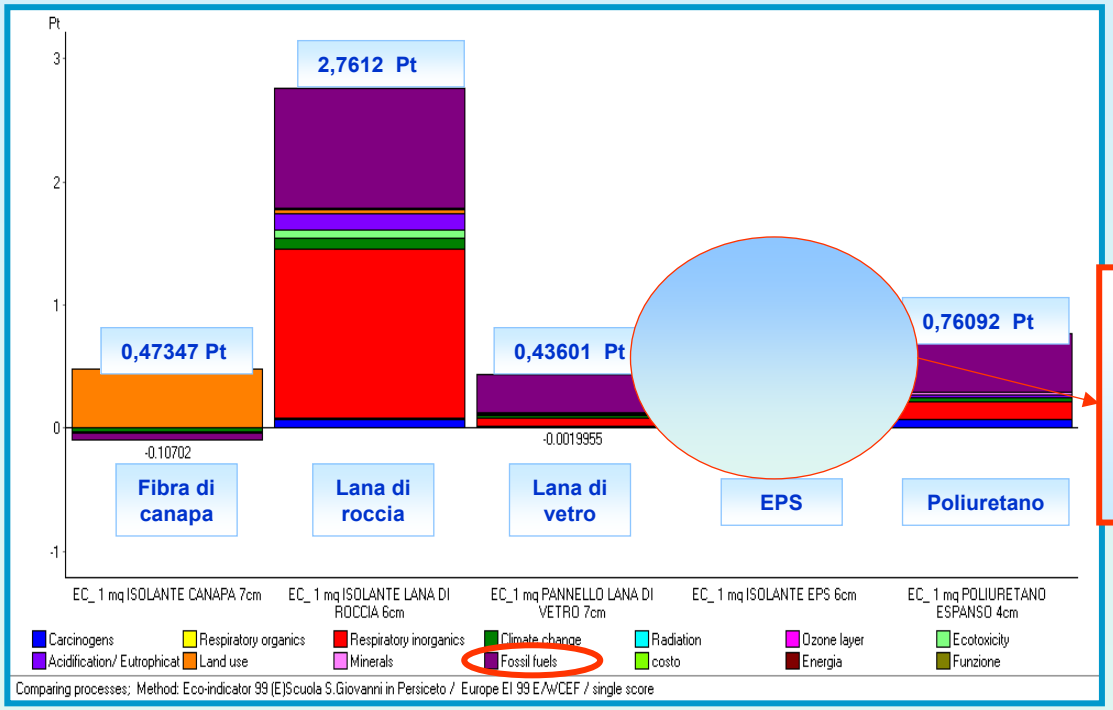
Polistirene espanso sintetizzato (EPS)

Poliuretano espanso

Isolanti nella muratura a cappotto

cassetta

ventilata



EPS supera PUR: differenza relativa nella quantità dei materiali

Analisi LCA per la scelta dell'isolante con Eco-Indicator 99

Inventario ⇨

Fibra di Canapa
(DATI da Azienda)

Lana roccia
(DATI da Azienda)

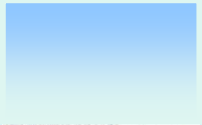
Fibra vetro

Polistirene espanso sintetizzato (EPS)

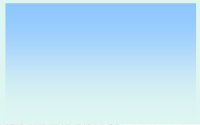
Poliuretano espanso

Isolanti nella parete ventilata

cassetta



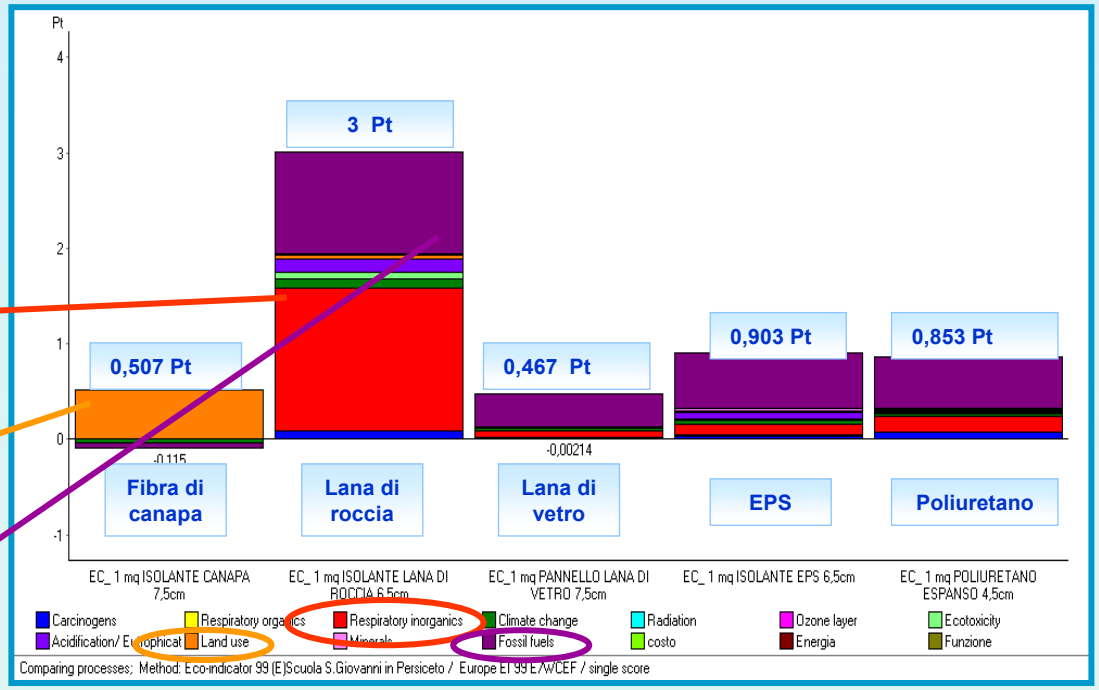
cappotto



Salute umana: grande emissione di polveri sottili

Qualità ecosistema: grande uso del suolo

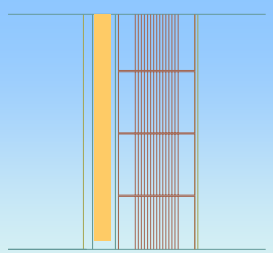
Risorse: minore consumo di combustibili fossili



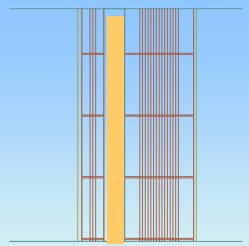
Scelta ⇨ **Lana di vetro**

Analisi LCA per la scelta del pacchetto tecnologico

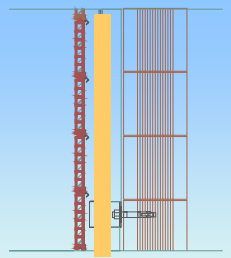
Inventario



Muratura a cappotto

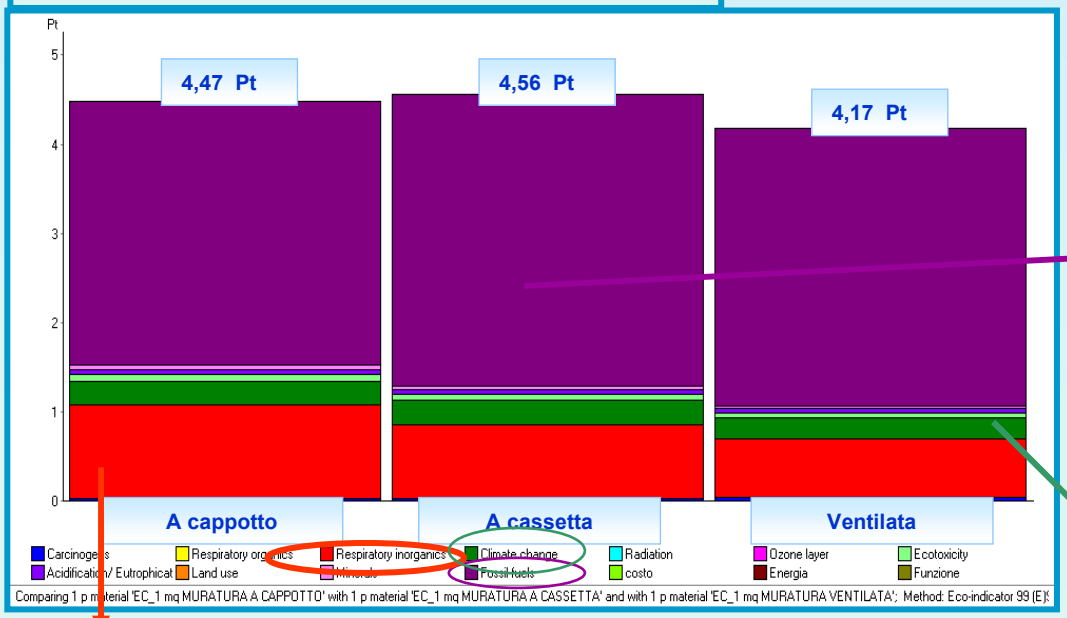


Muratura a cassetta



Parete ventilata

Valutazione con Eco-Indicator 99



EPS

EDIP

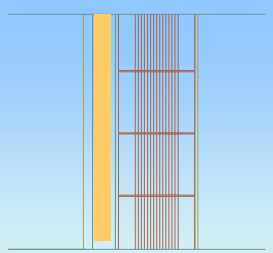
Risorse: maggiore consumo di energia dovuta alla cottura del laterizio

Qualità dell'ecosistema: Minore emissione di Zinco dovuto ad un minore percorso dei trasporti

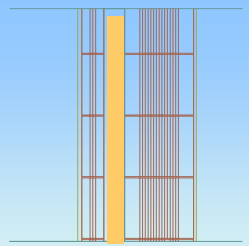
Salute umana: grande emissione di polveri dovuta al processo di produzione dell'intonaco

Analisi LCA per la scelta del pacchetto tecnologico

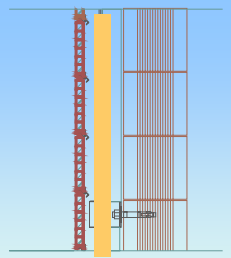
Inventario



Muratura a cappotto



Muratura a cassetta

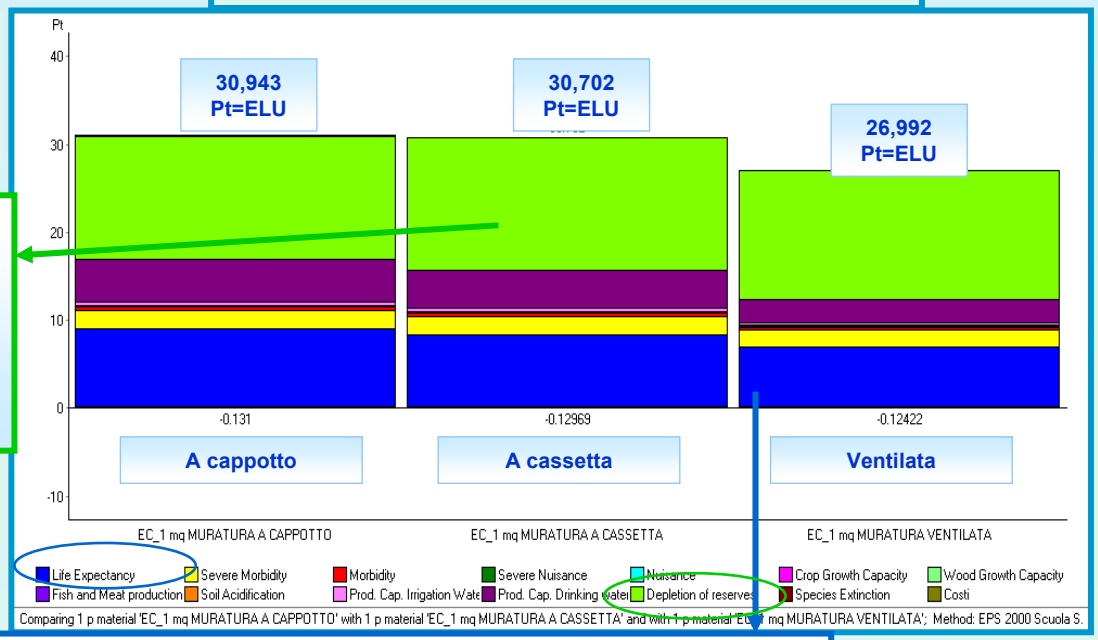


Parete ventilata

Valutazione con EPS 2000

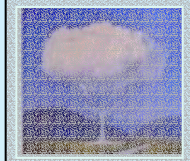
E-I

EDIP



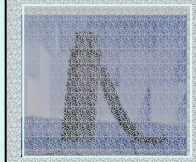
Risorse: maggiore consumo di energia dovuta alla cottura del laterizio

Aspettativa di vita: minore emissione di polveri dovuta al processo di produzione dell'intonaco

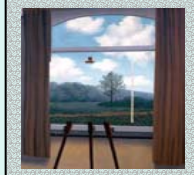


Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica



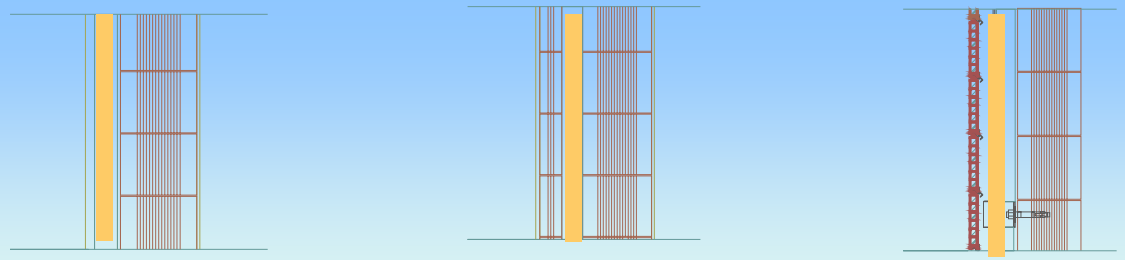
Fattibilità economica



Caso studio

Analisi LCA per la scelta del pacchetto tecnologico

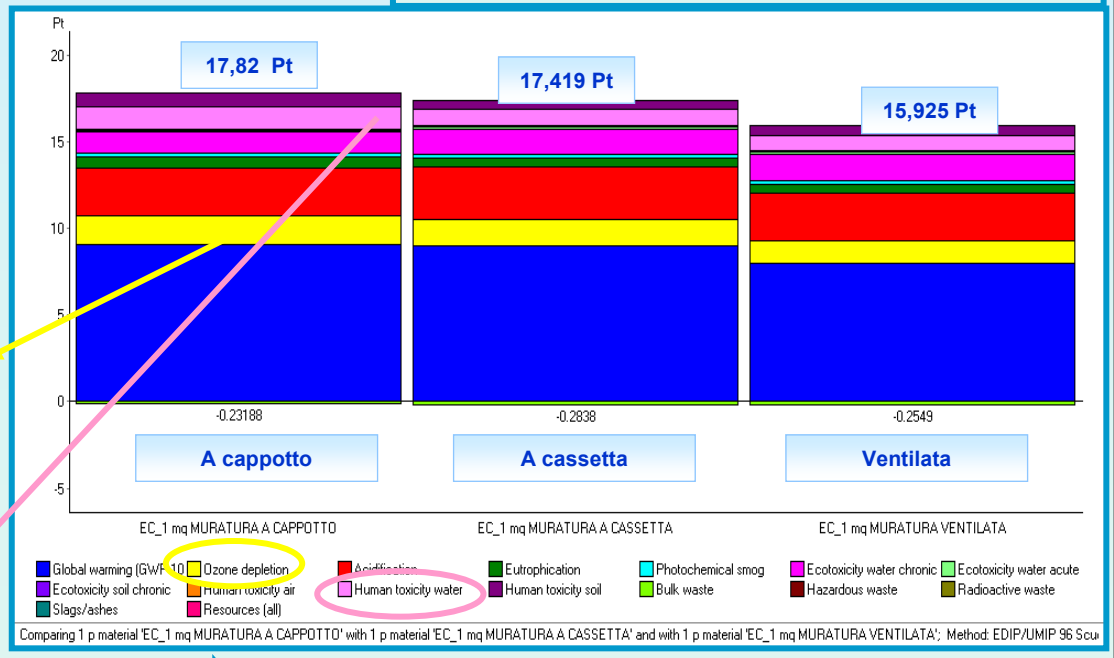
Inventario



Muratura a cappotto | Muratura a cassetta | Parete ventilata

E-I | EPS

Valutazione con EDIP 96



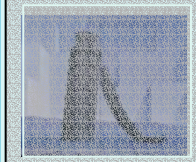
Impoverim. strato ozono: maggiore emissione di Halon nei trasporti

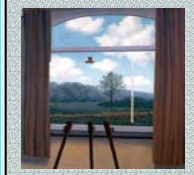
tossicità: maggiore emissione di metalli nei trasporti

Scelta → Parete ventilata

Life-Cycle Assessment

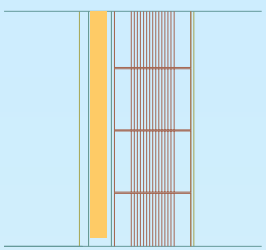
Efficienza energetica


Fattibilità economica

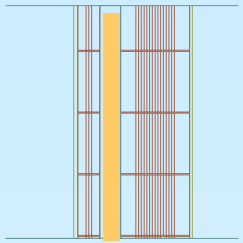

Caso studio

Analisi LCA per la scelta del pacchetto tecnologico

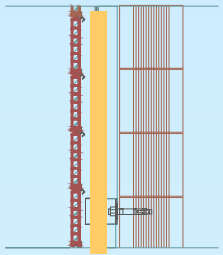
Inventario



Muratura
a cappotto

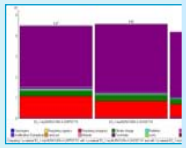


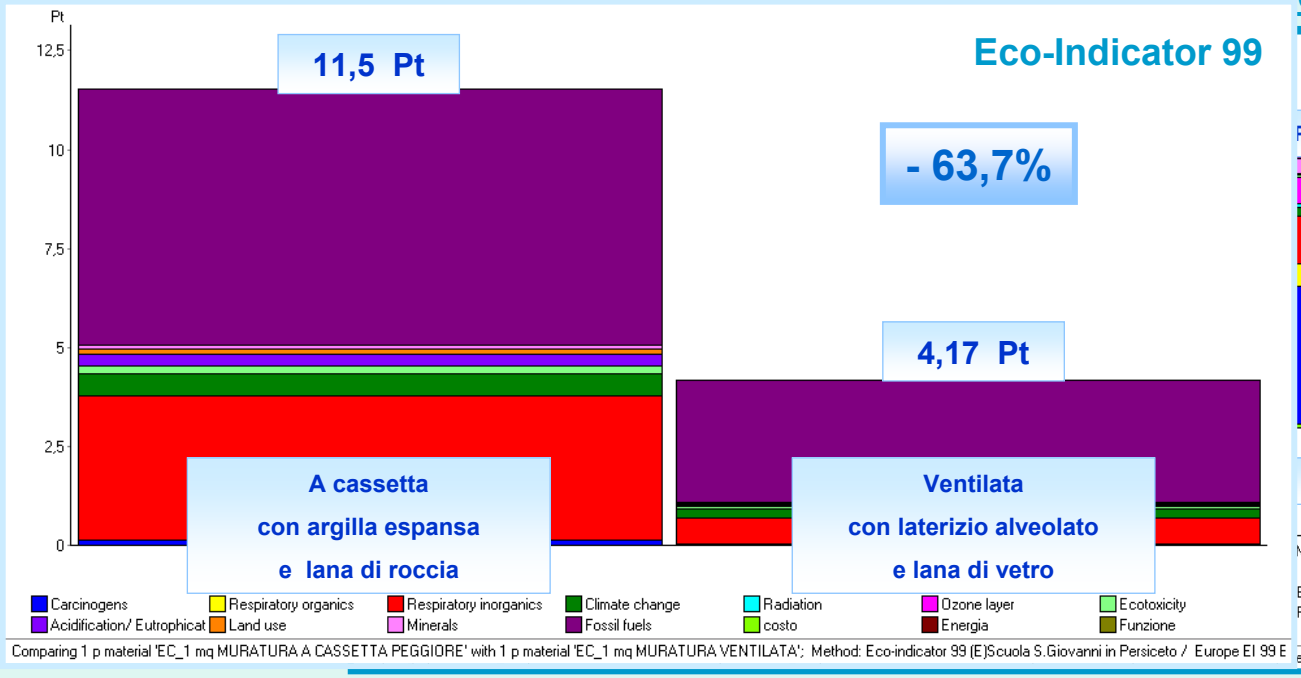
Muratura
a cassetta

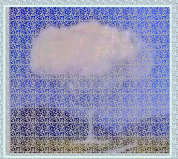


Parete
ventilata

Valutazione con EPS 2000

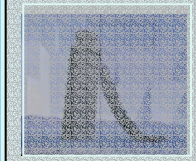






Life-Cycle
Assessment

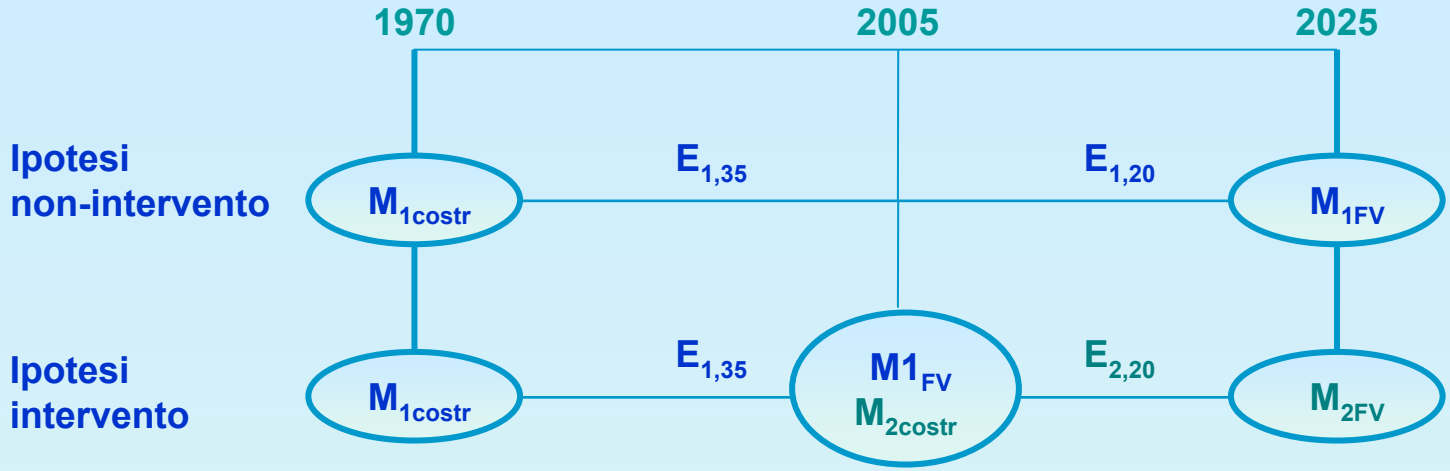
Efficienza
energetica

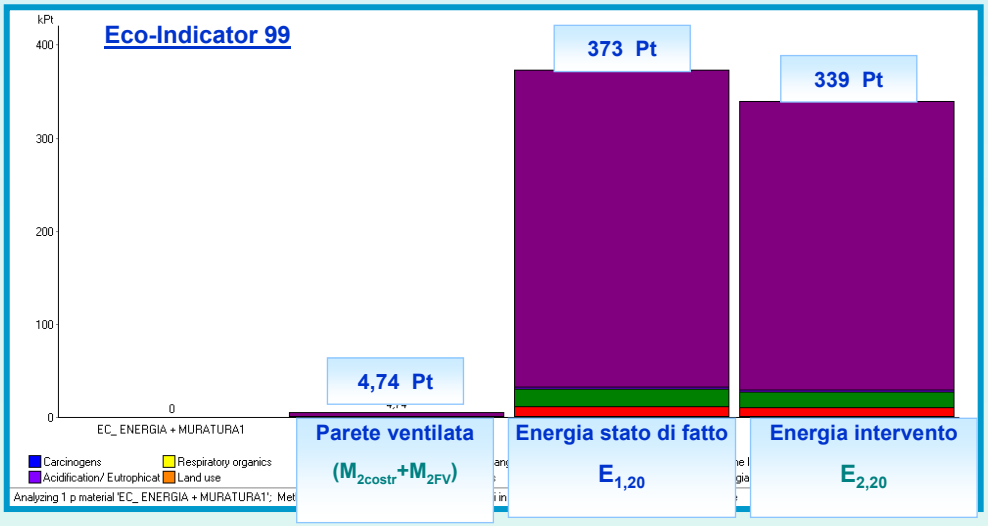


Fattibilità
economica

Caso studio

Convenienza ambientale dell'intervento: solo muratura

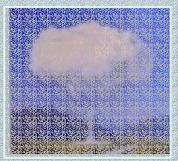




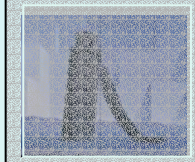
$$E_{1,20} > (M_{2costr}+M_{2FV}) + E_{2,20}$$

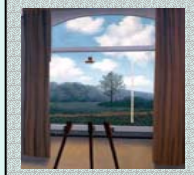
$$373 > 4,74 + 339$$

$$373 > 343,74$$

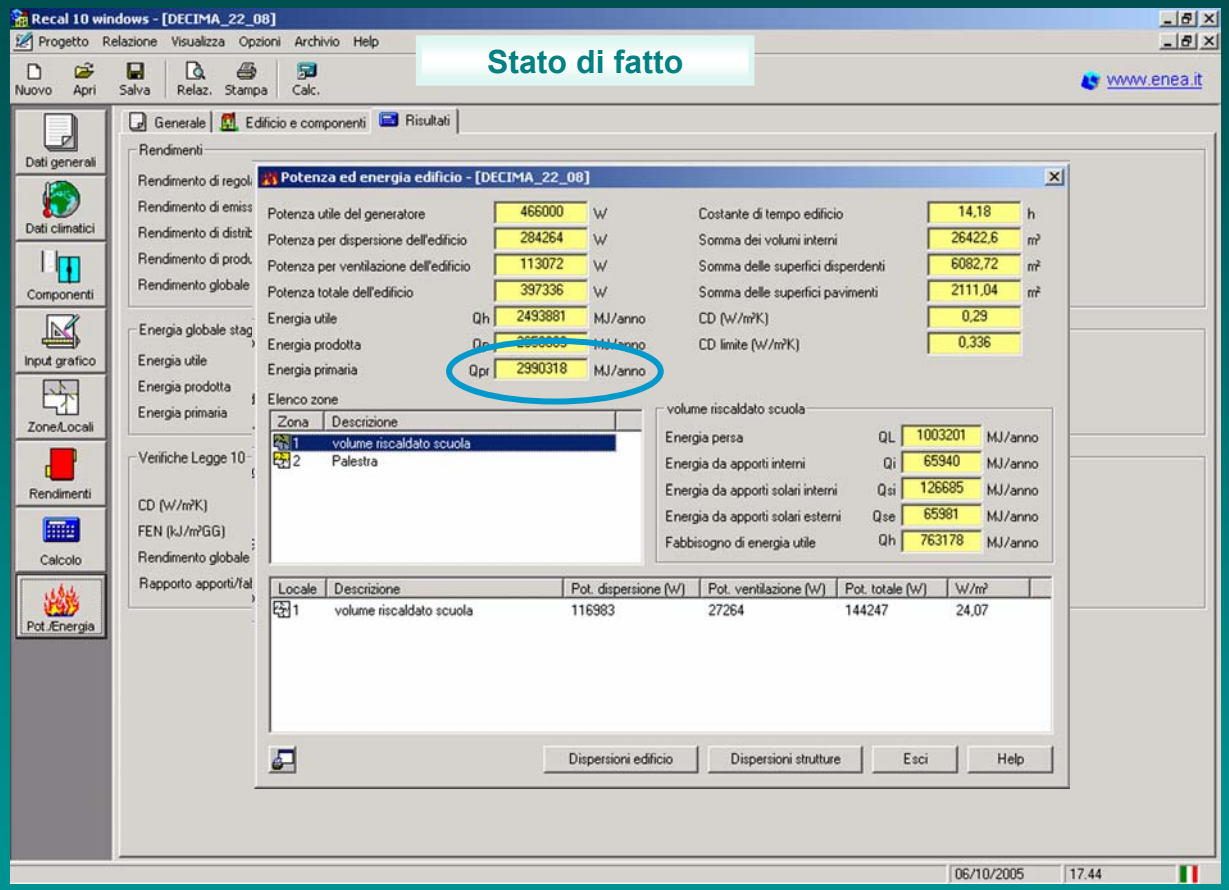

Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica


Fattibilità economica


Caso studio

Riduzione della dispersione energetica



Energia primaria [MJ/anno]

Stato di fatto
2.990.318

Sostituzione muratura
2.922.726

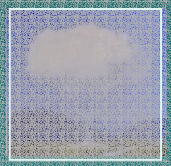
Intervento completo
1.236.463

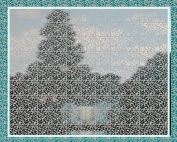
Energia primaria kWh/m²a

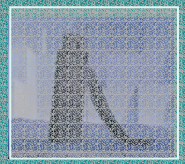
Stato di fatto
162 kWh/m²a

Sostituzione muratura
158 kWh/m²a

Intervento completo
67 kWh/m²a


Life-Cycle Assessment

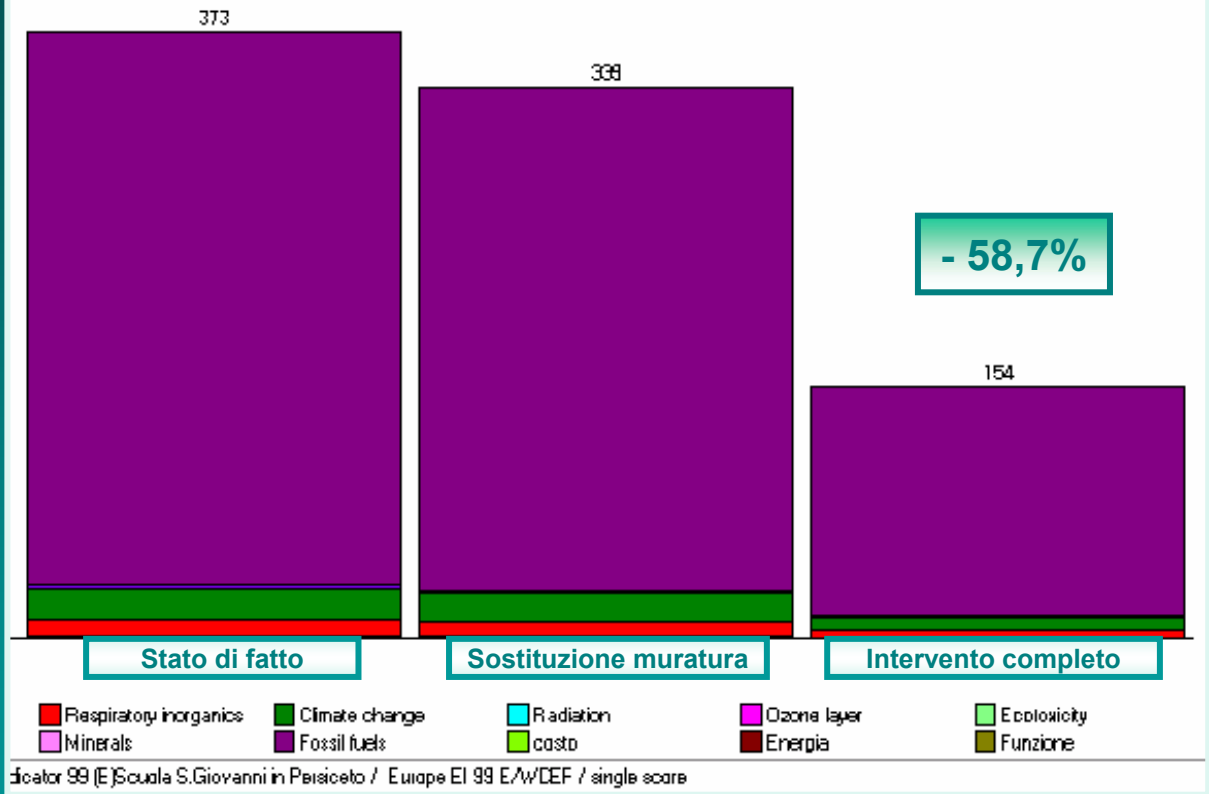

Efficienza energetica


Fattibilità economica

Caso studio

Riduzione della dispersione energetica

In 20 anni: **Eco-Indicator 99**



Energia primaria [MJ/anno]

Stato di fatto
2.990.318

Sostituzione muratura
2.922.726

Intervento completo
1.236.463

Energia primaria kWh/m²a

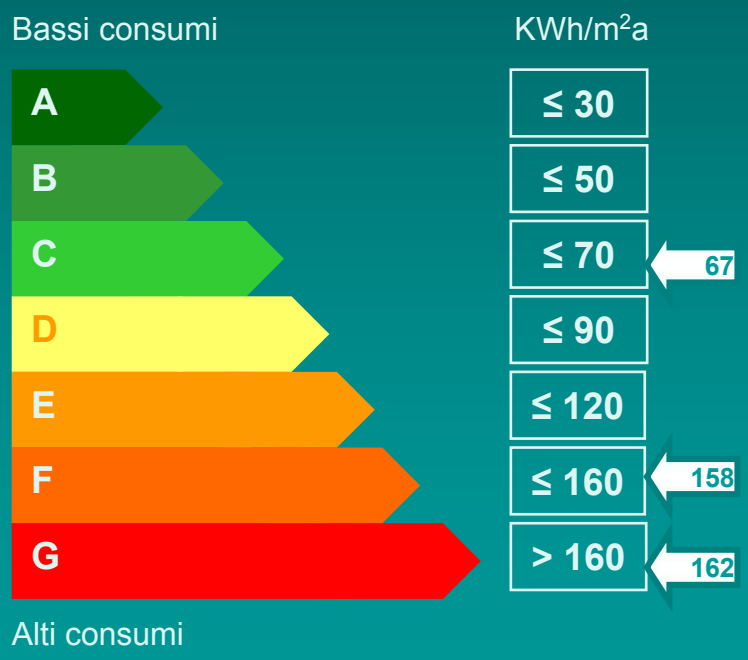
Stato di fatto
162 kWh/m²a

Sostituzione muratura
158 kWh/m²a

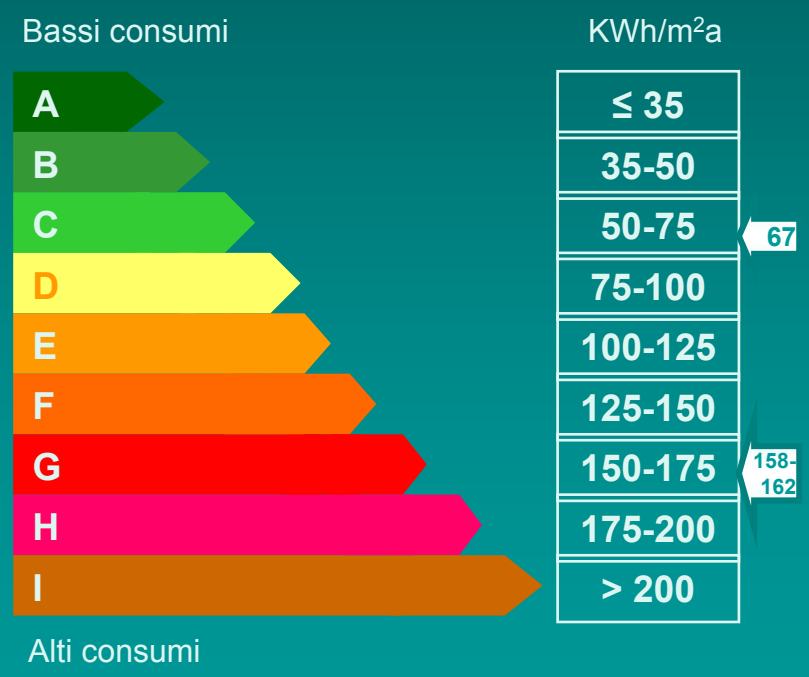
Intervento completo
67 kWh/m²a

Modelli di certificazione energetica

CASACLIMA
Bolzano

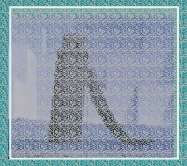


CARUGATE
Regione Lombardia



Life-Cycle Assessment

Efficienza energetica


Fattibilità economica

Caso studio

Prestazioni economiche dell'intervento

COSTI INTERNI

Stima dei costi di intervento

- **Opere di demolizione** → **27.747 €**
- **Opere di costruzione** → **140.257 €**
- **Costruzione muratura**
  - **A cassetta 28.149 €**
  - **A cappotto 35.522 €**
  - **ventilata 42.216 €**

TOTALE

- **A cassetta 196.153 €**
- **A cappotto 203.526 €**
- **ventilata 210.220 €**

Prestazioni economiche dell'intervento

COSTI INTERNI

Spesa per gas metano Prima dell'intervento → 33.000 €

Dopo l'intervento → 13.644 € → Risparmio di 19.356 €/anno

Stima del Valore Attuale netto (VAN) →

$$VAN = -I + \frac{(R_1-C_1)}{f_1} + \frac{(R_2-C_2)}{f_2} + \dots + \frac{(R_n-C_n)}{f_n}$$

→ VAN = 30.993 € → L'intervento è fattibile

Tempo di ritorno semplice (TRS) → Costo investimento/ flusso cassa → 11 anni ca.

Tempo di ritorno attualizzato (TRA) → VAN=0 → 16 anni ca.

Prestazioni economiche dell'intervento

COSTI ESTERNI

Energia spesa nello stato di fatto
- EPS 2000 → 8.489.994€
- Eco-Indicator 99 → 4.661.878€

Intervento sulla muratura
- EPS 2000 → 26,9 €
- Eco-Indicator 99 → 664,2 €

Energia dopo l'Intervento Sulla sola muratura
- EPS 2000 → 2.084.994€
- Eco-Indicator 99 → 1.512.997€

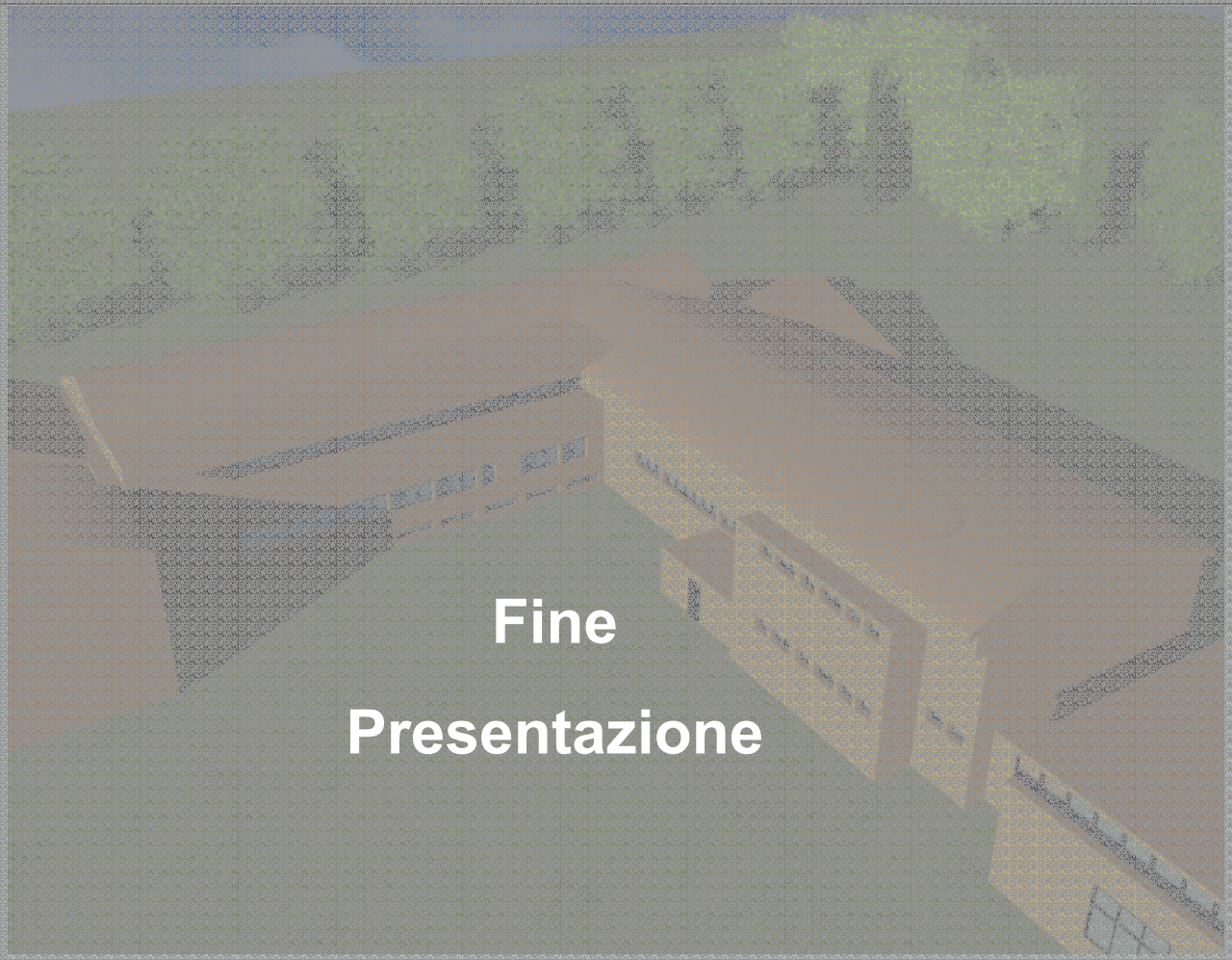
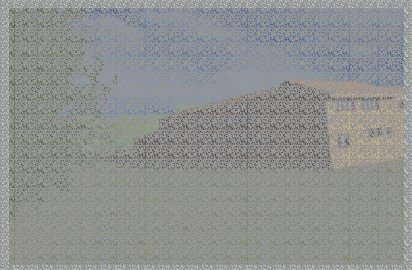
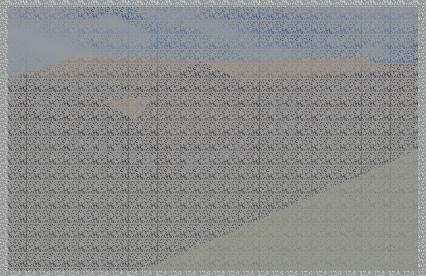
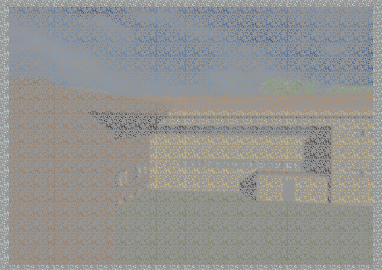
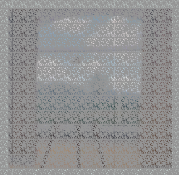
Conclusioni

Spesa energetica

Da
162 KWh/m²a
a
67 KWh/m²a

Impatto gas metano

-58,7%

Costi

210.220 €
TRA = **16** anni