

# Emissioni di inquinanti atmosferici dalla produzione di clinker di cemento

## *Approccio LCM in un caso di studio in Veneto*

Massimo Bressan\*, Maria Rosa\*, Davide De Dominicis\*, Piero Silvestri\*, Loris Tomiato\*

### Summary

*Atmospheric pollution from an industrial facility is usually framed within the straightforward assessment of legislative compliance to emission limits. An alternative approach is to look at the problem from a wider point of view by assessing “cradle-to-grave” the atmospheric pollution burden throughout all stages of the life cycle product. This work is addressing, for the case study of a cement plant in Northern East of Italy, the evaluation of relative impacts of the different stages of clinker production into atmospheric emissions of carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and particulate matter (PM). Performance indicators were calculated to measure environmental impacts of the final product (clinker) both in relation to the production trend from 2006 to 2008 and also with reference to the benchmarking of standard reported in the sector references (BAT).*

### Keywords

Cement plant, atmospheric emissions, NO<sub>x</sub>, CO, PM, life cycle management, clinker, environmental performance indicators, benchmarking, BAT

### Introduzione ed Obiettivi

Il presente lavoro ha l'obiettivo di stimare “dalla culla alla tomba” le emissioni atmosferiche connesse alla produzione di clinker di cemento in un impianto situato nel Comune di Pederobba (Treviso).

Le valutazioni *Life Cycle Assessment (LCA)*, a cui è immediato il richiamo formale o almeno procedurale, prevedono uno studio dettagliato del contesto produttivo e territoriale, delle fasi di lavorazione, delle matrici ambientali e dei fattori di rischio più significativi, delle migliori tecniche e tecnologie disponibili, dei sistemi di monitoraggio e di controllo. Tutto questo articolato processo di valutazione ha però un limite molto evidente nei tempi solitamente molto lunghi di raccolta e analisi dati che confliggono con l'esigenza di definire strumenti operativi efficaci ed efficienti per la gestione ambientale d'impresa.

Recentemente è, quindi, emerso un interesse crescente verso un approccio di più ampia prospettiva, definito *Life Cycle Management (LCM)*, che, svincolandosi da predefinite e codificate metodologie di analisi, propone strumenti rapidi e di agile definizione necessari per ottimizzare e integrare tutti gli aspetti ambientali, economici e sociali di una determinata produzione industriale (Horne *et al.*, 2009; Remmen *et al.*, 2007). Il contenuto di questo lavoro riflette tali orientamenti metodologici proponendo, nel caso specifico, *esclusivamente per la matrice atmosfera e per gli inquinanti monossido di carbonio (CO)*,

\* ARPAV, Dipartimento Provinciale di Treviso, Via Santa Barbara 5/a, 31100 TREVISO  
e-mail autore: mbressan@arpa.veneto.it

ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) e polveri (PM), un approccio di valutazione per la stima complessiva del carico inquinante *inglobato* in unità prodotto finito espresso come massa di inquinante atmosferico emesso su massa unitaria di clinker prodotto. Queste stime rappresentano, di fatto, degli “indicatori di *performance* ambientale” che valutano in modo trasparente e ripercorribile il carico ambientale connesso alla produzione di clinker e garantiscono la possibilità di un’analisi comparata (*benchmarking*) rispetto agli standard di settore (riportati sia nelle BAT specifiche del comparto cemento che in altri documenti tecnici di riferimento).

Gli indicatori di *performance*, in ultima analisi, rappresentano degli strumenti fondamentali per il supporto alle decisioni volto ad assicurare un continuo miglioramento degli impatti produttivi nel contesto ambientale esteso (cioè non esclusivamente riferito ai processi all’interno dell’impianto industriale).

Chiarito l’inquadramento generale, questo lavoro considera due differenti livelli operativi: l’indirizzo strategico ARPAV di approfondimento dello stato di conoscenza del comparto industriale del cemento e dei relativi impatti ambientali sul territorio della Regione Veneto e il riferimento tecnico normativo alle prescrizioni della “Direttiva IPPC” sul controllo integrato ambientale (e al procedimento di Autorizzazione Integrata Ambientale - AIA), nonché ai principi guida definiti negli “strumenti volontari” di certificazione ambientale (tra cui ricordiamo, ISO 14000-14040, EMAS, Ecolabel, bilancio ambientale d’impresa). Questi strumenti innovativi, per la cui definizione operativa ARPAV ha partecipato attivamente al Gruppo di Lavoro Nazionale ISPRA (cfr. siti web consultati), spingono i processi industriali verso livelli di efficienza più elevati indirizzando i principali soggetti (gestore d’impianto ed autorità di controllo) verso il superamento dell’approccio *command and control* per un efficace ed efficiente sistema di gestione ambientale partecipato e condiviso.

### **Descrizione dell’impianto industriale e del relativo contesto ambientale**

Il cementificio è ubicato nel Comune di Pederobba in un’area delimitata a Est dal fiume Piave, a Ovest dalla strada regionale “Feltrina”, a Nord e a Sud da terreni demaniali con destinazione ad uso agricolo ed in parte seminaturale. L’impianto di dimensioni medio-grandi lavora a ciclo continuo e ha una capacità produttiva di cemento di circa 1.000.000 t/anno.

Il processo avviene per “via secca” con forno rotativo, pre-riscaldatore costituito da una torre a sospensione con cicloni a 4 stadi e pre-calcinatore ad aria terziaria. Il sistema di abbattimento

delle emissioni atmosferiche è costituito da una sezione di raffreddamento e di condizionamento dei fumi e da un sistema di depolverazione con filtro a maniche (per le emissioni dal forno di cottura) o elettrofiltro (per le emissioni dal raffreddatore del clinker). Una miscela di *pet coke* e pneumatici fuori uso, preventivamente triturati, viene normalmente utilizzata come combustibile principale in alimentazione all’impianto.

### **Motivazioni del lavoro e tipo di valutazione proposta**

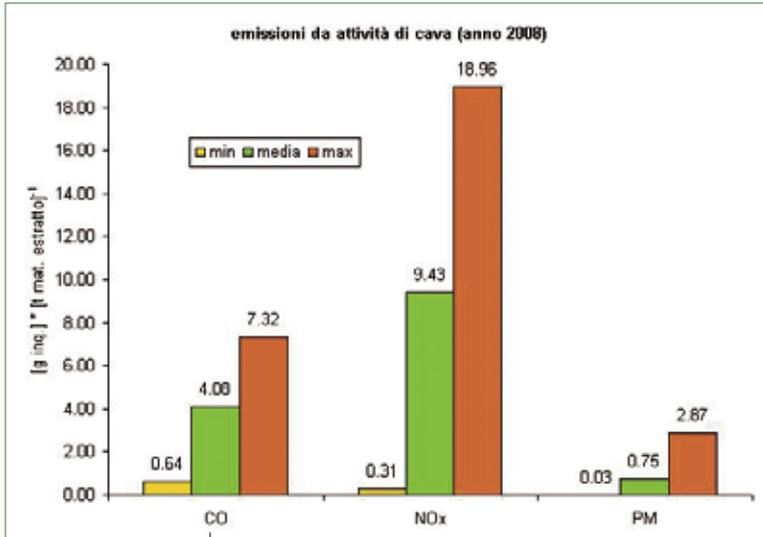
Il presente lavoro è indirizzato all’individuazione di elementi di valutazione integrativi e alternativi al classico approccio *command and control* prescritto dalla normativa di settore per la valutazione dell’impatto ambientale dei siti industriali (la cui conformità alla normativa vigente è stata ampiamente valutata nell’ambito del progetto che ha prodotto tutta la documentazione tecnica resa disponibile presso il sito ARPAV - per maggiori dettagli cfr. siti web consultati).

I risultati discussi di seguito trattano le emissioni degli inquinanti monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) e polveri (PM), emessi durante le principali fasi di produzione del clinker che sono, “dalla culla alla tomba”, sinteticamente riassumibili in: estrazione della materia prima dalla miniera, trasporto stradale di materia prima e seconda, additivi e combustibili fino allo stabilimento, preparazione, lavorazione e cottura della farina cruda nel forno, raffreddamento e macinazione del clinker, insaccatura e spedizione del prodotto finito.

I risultati di stima delle emissioni atmosferiche nelle varie “fasi del ciclo di vita” del clinker sono presentati per il 2008 in dettaglio dalla “culla” (estrazione materia prima dalla miniera) alla “tomba” (insaccamento per spedizione del prodotto finito). Per il triennio 2006-2008 sono proposti degli indicatori di *performance* che misurano l’andamento temporale delle prestazioni ambientali dell’attività industriale e la congruenza rispetto a specifici standard di riferimento (*benchmarking*) riportati nella letteratura tecnica di settore.

### **Metodologia, presentazione discussione dei risultati**

Nei paragrafi successivi sono sinteticamente descritte le metodologie di valutazione adottate e sono contestualmente presentati i risultati di stima delle emissioni atmosferiche degli inquinanti monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) e polveri (PM) emessi “dalla culla alla tomba” durante le principali fasi di produzione del clinker di cemento: attività estrattiva, trasporto stradale, preparazione e cottura della farina. Inoltre, sono definiti tre indicatori di



**Figura 1**  
Stima delle emissioni nel 2008 degli inquinanti atmosferici emessi per unità di materiale estratto dalla miniera di marna presso il Comune di Possagno [g inquinante]\*[t materiale estratto]<sup>-1</sup>: fattori di emissione minimo, medio e massimo ricavati dall'applicazione di differenti metodologie di calcolo.

*performance* per monitorare l'efficacia e l'efficienza ambientale del processo produttivo del clinker di cemento. Con ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) si intende una miscela di monossido (NO) e di biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) quantificata ed espressa in termini di NO<sub>2</sub> equivalenti. Con polveri (PM) si intende tutti gli inquinanti in forma di particolato senza alcuna distinzione granulometrica (che non è quasi mai possibile dai dati e dalle metodologie disponibili oltre ad essere sostanzialmente ininfluenza rispetto all'obiettivo specifico del presente lavoro).

**Stima delle emissioni off road da attività mineraria (alcune metodologie a confronto)**

Nelle miniere in concessione al cementificio presso il Comune di Possagno e il Comune di Onigo non sono svolte lavorazioni di arricchimento del minerale estratto. Le emissioni atmosferiche più significative sono dovute ai mezzi *off-road* impiegati nell'attività di disboscamento, scorticatura, scavo, frantumazione e stoccaggio provvisorio del minerale. Per la stima delle emissioni atmosferiche prodotte dall'estrazione della marna (nel Comune di Possagno) e della calcarenite (nel Comune di Onigo) sono state utilizzate le informazioni relative al numero e alla tipologia di mezzi impiegati e al consumo annuo di carburante indicate nei periodici rapporti ambientali prodotti dalla ditta (Cementirosi, 2009). I fattori di emissione utilizzati per valutare l'impatto atmosferico da combustione del carburante per i mezzi *off-road* (macrosettore CORINAIR 08) sono riportati nelle pubblicazioni tecniche dell'Agenzia Federale Svizzera per l'Ambiente (BAFU, 2008), dell'Agenzia per la Protezione Ambientale Americana (EPA, 2004), dell'Agenzia Ambientale Europea (EEA, 2006, 2009) e dell'ex Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA, 2002). Per

completare la stima delle emissioni totali annue è stato considerato un indice di attività (numero di ore di lavoro per mezzo e per anno) ricavato dalla letteratura tecnica sopra elencata.

Per la stima delle emissioni dall'attività estrattiva delle altre materie prime (calcare), provenienti da miniere per cui non erano disponibili informazioni sufficienti, è stato utilizzato il quantitativo annuo di materie prime (esclusa la marna) pesato in ingresso all'impianto industriale e il valore medio dei fattori di emissione definiti per le miniere di Possagno e Onigo.

Nel grafico in **Figura 1** sono rappresentate le stime per l'anno 2008 del valore minimo, medio e massimo delle emissioni di CO, NO<sub>x</sub> e PM espresse in massa di inquinante per massa di materiale estratto. C'è da ribadire che tali stime considerano solo le emissioni da combustione dovute all'attività dei mezzi *off-road* e non comprendono, quindi, tutte le emissioni dovute al sollevamento e al trasporto meccanico delle polveri originato dall'attività di disboscamento, scorticatura, scavo, frantumazione e stoccaggio provvisorio del minerale. D'altro canto, c'è da rilevare che si tratta in prevalenza di materiali umidi che non rappresentano come tali una fonte significativa di polveri diffuse (inoltre, l'azienda provvede alla sistematica bagnatura delle vie di carreggio e al lavaggio delle ruote dei mezzi in uscita dalla miniera).

Come evidente dal grafico risulta una significativa variazione (fino a 2 ordini di grandezza) tra il valore minimo e massimo delle emissioni che rende conto delle difficoltà e delle incertezze associate a una stima che non ha un consolidato e condiviso riferimento metodologico. In relazione alle specifiche fonti trattate nel presente studio, il macrosettore CORINAIR 08 (EEA, 2009, ISPRA, 2009), è stato definito da alcuni autori come il "settore dimenticato" (Lambrecht *et al.*, 2007).

**Stima delle emissioni da trasporto su strada (metodologia COPERT)**

Per la stima delle emissioni di inquinanti atmosferici da trasporto stradale di materie prime e seconde, combustibili e prodotto finito è stata utilizzata la metodologia di calcolo COPERT (*Computer Programme to calculate Emissions from Road Traffic*), adottata dall'Agenzia Europea per l'Ambiente come strumento di valutazione nell'ambito del programma EMEP/CORINAIR (EEA, 2006, 2009). Il modello COPERT (Ntziachristos and Samaras, 2000) assume dei fattori di emissione differenziati per: tipologia veicolare, combustibile, anno di immatricolazione, cilindrata, peso, regime medio di conduzione, composizione del parco veicolare circolante e condizioni climatiche medie.

La stima delle emissioni totali di inquinanti

prodotte dal trasporto stradale è la sommatoria delle componenti emissive da combustione, evaporazione ed abrasione per usura di freni, pneumatici e manto stradale (Lükewille *et al.*, 2001). Le emissioni abrasive sono stimate dai fattori di emissione proposti da IIASA (*International Institute for Applied Systems Analysis*). I dati in ingresso al modello di stima sono: i conteggi di mezzi pesanti rilevati dal portale aziendale per la pesata dei materiali in entrata ed in uscita all'impianto, le distanze medie di provenienza e di destinazione del materiale trasportato, la velocità media di conduzione (stimata in circa 40 km/h).

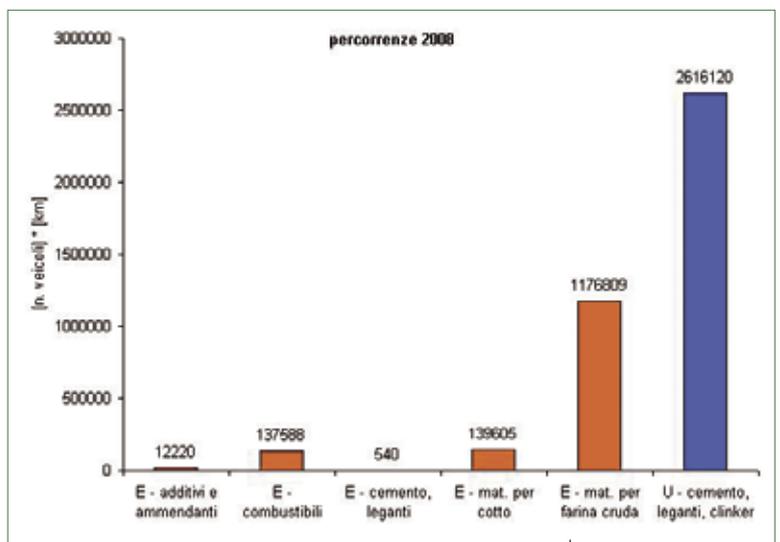
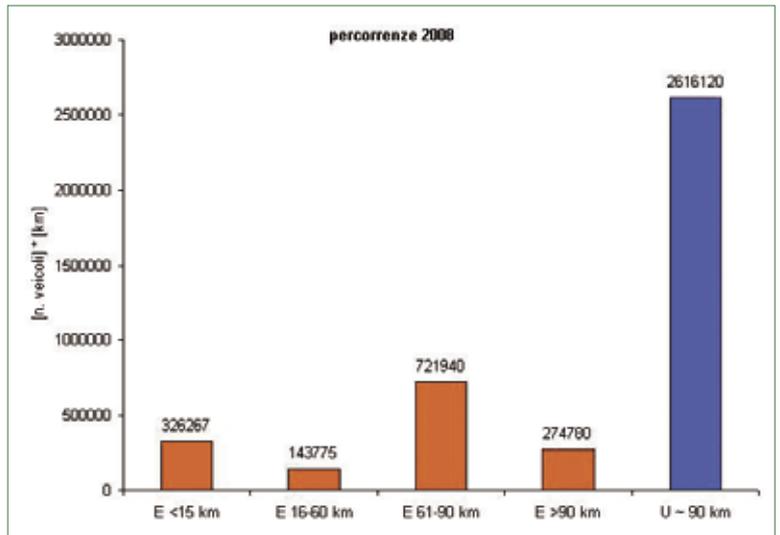
Le tipologie veicolari considerate sono le classi COPERT da 71 a 82, cioè i mezzi autoarticolati ad alimentazione diesel con peso complessivo compreso tra 16 e 32 tonnellate oppure superiori, statisticamente assegnate al conteggio dei mezzi rilevati dal portale dell'impianto industriale sulla base della percorrenza delle rispettive categorie veicolari ricavata dal parco circolante della Regione Veneto per gli anni di riferimento 2006-2008.

In **Figura 2** sono rappresentate le percorrenze per l'anno 2008 dei mezzi in entrata ed in uscita dall'impianto di Pederobba ripartite per fascia chilometrica, destinazione finale e categoria merceologica.

La percorrenze annue più elevate in ingresso all'impianto sono dovute al trasporto delle materie prime per la composizione della farina cruda (grafico in basso in Figura 2) per il forno di cottura (calcare, marna, fanghi inerti, scaglie laminazione, polveri e particelle di materiale ferroso). Circa un terzo di tali percorrenze è data dal trasporto della marna estratta dalla miniera di Possagno, a una distanza inferiore a 15 km (grafico in alto in Figura 2), che rende conto di un'efficienza di approvvigionamento garantita dalla possibilità di sfruttare "fonti locali" che concorrono a limitare significativamente le emissioni atmosferiche complessive.

In **Figura 3** sono rappresentate le emissioni del 2008 di CO (grafico in alto a sinistra), NO<sub>x</sub> (grafico in alto a destra) e polveri PM (grafico in basso a sinistra), ripartite per categoria merceologica e per destinazione finale; inoltre, sono rappresentate le emissioni medie complessive (grafico in basso a destra) dovute al trasporto stradale di tutti i materiali in entrata ed in uscita dall'impianto (valore medio pesato in funzione del quantitativo complessivo di materiali trasportati).

I grafici evidenziano che le emissioni annue di CO, NO<sub>x</sub> e PM dovute al trasporto *in entrata* all'impianto variano tra un valore minimo per i materiali costituenti la farina cruda e un valore massimo per gli additivi e gli ammendanti.



Il trasporto dei combustibili incide in modo limitato considerato l'utilizzo degli pneumatici fuori uso approvvigionati entro un raggio di circa 10 km.

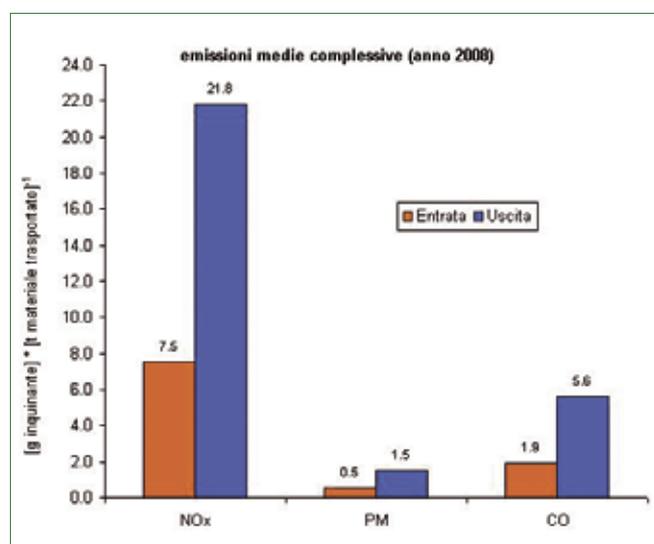
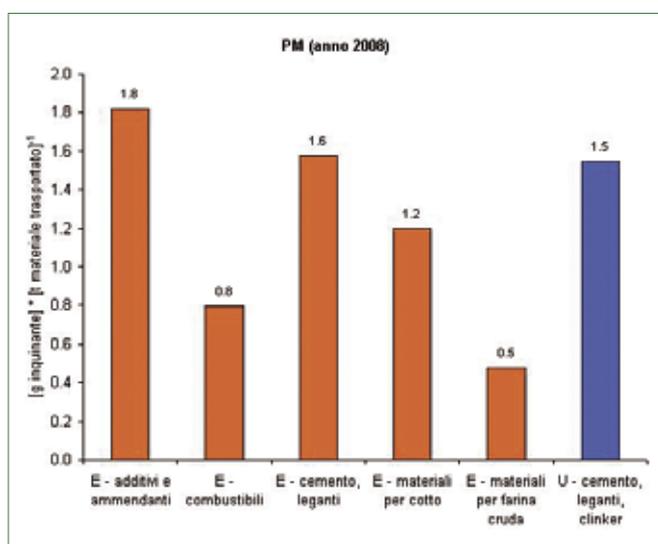
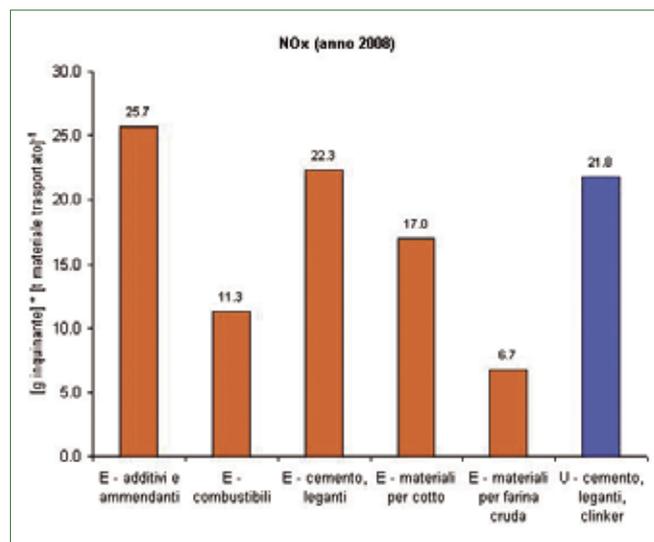
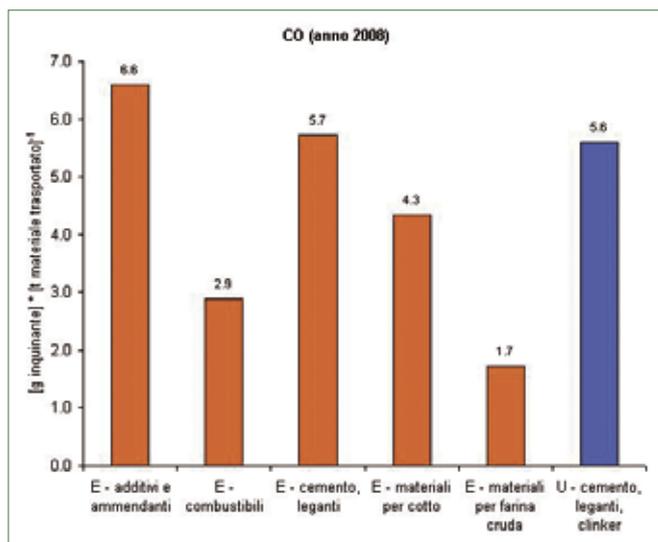
Significativa è, invece, l'emissione associata al trasporto *in uscita* dall'impianto con percorrenze che rientrano nella fascia di distanza media di circa 90 km dall'impianto; rispetto a tutte le tipologie di materiale trasportato l'emissione dovuta ai flussi in uscita è circa tre volte quella in entrata.

In termini generali, l'analisi dei grafici individua le possibili aree di intervento per migliorare le prestazioni ambientali associate al trasporto su strada e, quindi, permette di rendere oggettive e ripercorribili le scelte operate nelle politiche ambientali d'impresa.

#### **Stima delle emissioni convogliate (SME e controlli ispettivi)**

In questo paragrafo sono presentate le modalità ed i risultati di stima delle emissioni atmosferiche

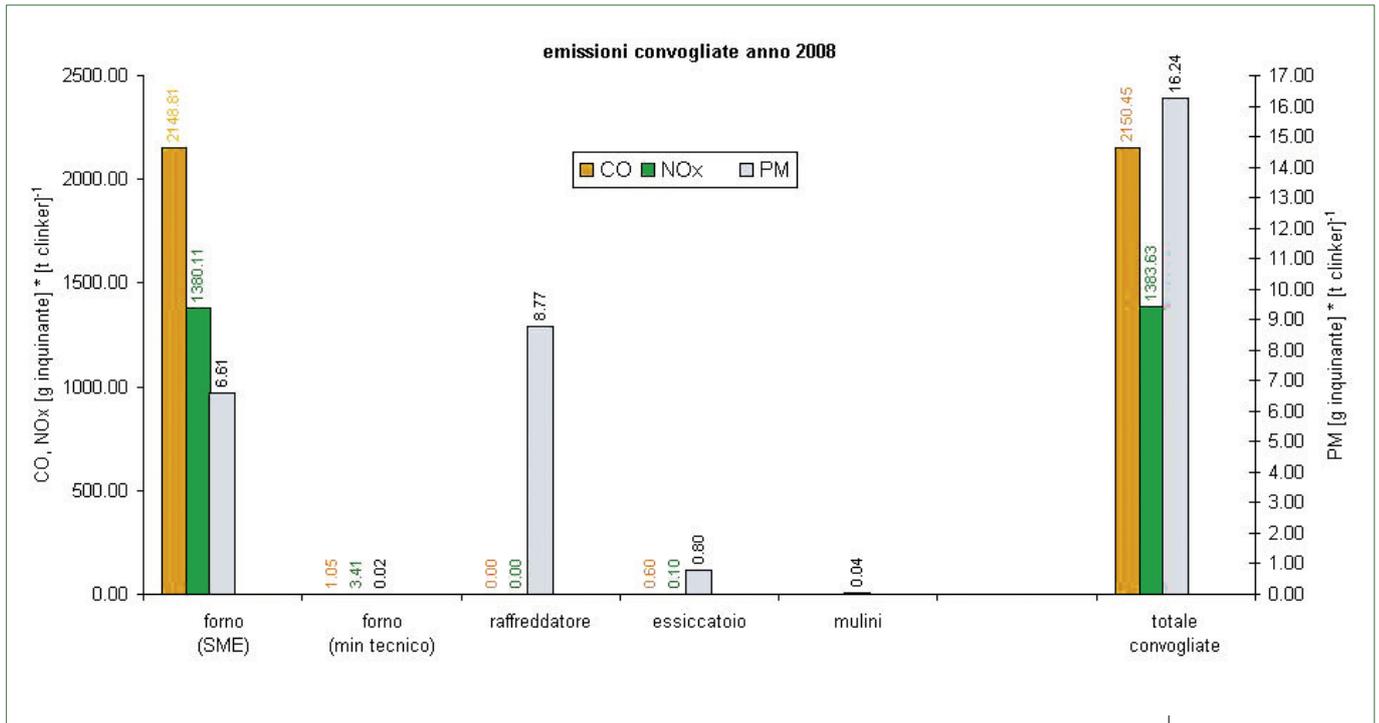
**Figura 2**  
Stima delle percorrenze complessive nel 2008 espresse in [n. veicoli]\*[km] dal trasporto su strada ripartite per categoria merceologica (additivi e ammendanti, combustibili, cemento, leganti, materia per cotto, materiale per farina cruda, clinker) e destinazione finale (E = entrata; U = uscita dall'impianto).



**Figura 3**  
Stima delle emissioni nel 2008 [g inquinante] \* [t materiale trasportato]<sup>-1</sup> di CO, NO<sub>x</sub> e PM da trasporto stradale dei materiali in ingresso ed uscita all'impianto industriale ripartite per categoria merceologica (additivi e ammendanti, combustibili, leganti, materia per cotto, materiale per farina cruda) e per destinazione finale (E = entrata; U = uscita dall'impianto).

convogliate di NO<sub>x</sub>, CO e PM dai camini del forno di cottura della farina, di essiccazione del calcare, di raffreddamento del clinker, e dei mulini per la macinazione del *pet coke*. Le valutazioni per il triennio 2006-2008 sono basate sulle misure rilevate dal sistema di monitoraggio in continuo (SME) a camino del forno di cottura della farina e/o dai controlli ispettivi in discontinuo (ARPAV) presso gli altri punti di emissione. In condizioni di normale funzionamento, l'impianto è alimentato da una miscela di *pet coke* e pneumatici fuori uso preventivamente tritati. L'alimentazione con pneumatici non può superare il limite autorizzativo del 60% del calore complessivo fornito al processo ed è esclusa in condizioni di esercizio inferiori al minimo tecnico. Nelle fasi transitorie di "minimo tecnico", il sistema di monitoraggio in continuo delle emissioni a camino del forno (SME), che è costituito da una sonda multiparametrica FTIR per gli inquinanti gassosi (fra cui CO e NO<sub>x</sub>) e da un sistema di scattering a infrarosso per le polveri (PM),

non valida le misure di emissione che vengono comunque acquisite. E' stato quindi necessario completare la valutazione tramite un confronto con una stima indiretta utilizzando la variabile proxy ottenuta dal rapporto tra portata effettiva oraria della farina in ingresso al forno sul corrispondente valore della media oraria annuale (t/h). Questa nuova variabile ha permesso di "modulare" la stima del flusso di massa orario di inquinante a camino (mg/h) noto il corrispondente valore medio orario su base annuale. Inoltre, seppur poco rilevanti rispetto al normale funzionamento, sono state considerate anche le fasi transitorie per fermate programmate od impreviste cioè le ore di attività d'impianto con forno in "preriscaldamento". Per gli altri punti di emissione convogliata (raffreddatore clinker, essiccatoio calcare, mulini *pet coke*) la stima è stata basata sui controlli in discontinuo ARPAV e sulle informazioni di processo (numero di ore effettive di attività) fornite dal sistema di controllo distribuito (DCS).



Nel grafico in **Figura 4** sono rappresentate le emissioni annue convogliate, espresse in massa di inquinante per unità di clinker prodotto, di monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) (asse y a sinistra) e polveri (PM) (asse y a destra), distinte per i rispettivi camini di emissione (forno farina, raffreddatore clinker, essiccatoio calcare, mulini *pet coke*) e per regime di conduzione (normale vs. minimo tecnico); è inoltre indicata per ciascun inquinante considerato la stima delle emissioni totali convogliate d’impianto come somma dei contributi relativi dei vari camini.

Il contributo del forno di cottura della farina ammonta a quasi la totalità delle emissioni di CO e NO<sub>x</sub> (> 99%) mentre, per PM, rappresenta solo una frazione limitata (circa 41%) perché bisogna considerare anche il raffreddatore del clinker (circa 54%). Inoltre, dal grafico si evince per tutti gli inquinanti considerati che le emissioni in regime di minimo tecnico rappresentano una frazione sostanzialmente trascurabile delle emissioni totali (<1%).

#### Indicatori di performance ambientale e benchmarking

I documenti di riferimento (Bref) sulle migliori tecnologie disponibili (BAT) per la produzione di clinker di cemento prescrivono sia l’adeguamento allo stato dell’arte delle tecniche di processo e dei rispettivi aspetti gestionali, che la proposta di indicatori di *performance* utili per garantire il miglioramento continuo secondo gli obiettivi tipici di un sistema di gestione della qualità. Il tentativo proposto nel presente lavoro è

definire degli indicatori di *performance* ambientale che, rispetto al *benchmarking* di settore per il triennio 2006-2008, siano in grado di misurare il carico emissivo di inquinanti atmosferici per unità di prodotto finito (clinker) relativamente alle principali fasi del processo industriale. Gli indicatori qui proposti sono:

- *rateo forno* che considera solo le emissioni atmosferiche per unità di clinker prodotto convogliate dal sistema di abbattimento connesso al forno di cottura della farina rilevate dal sistema di monitoraggio in continuo (SME) e/o dai controlli ispettivi in discontinuo (ARPAV); nel calcolo dell’indicatore sono comprese anche le emissioni a camino del forno stimate per le fasi di “minimo tecnico”;
- *franco impianto* che considera, in aggiunta alle precedenti, le emissioni per unità di clinker provenienti dagli altri punti convogliati (camini) connessi con le principali fasi del processo industriale (essiccatoio calcare, mulini *pet coke*, raffreddatore clinker); in tale indicatore sono comprese, inoltre, le emissioni originate dai mezzi *off-road* per l’estrazione e la lavorazione dei minerali (materie prime) e dai mezzi per il trasporto su strada fino all’impianto di materie prime e seconde, additivi, ammendanti e combustibili;
- *franco destino* che somma ai precedenti contributi anche le emissioni dovute al trasporto su strada fino a destinazione finale del prodotto finito (clinker).

In **Figura 5** sono riportati per monossido di carbonio (CO - grafico in alto a sinistra), ossidi di

**Figura 4**  
Stima delle emissioni convogliate [g inquinante]\*[t clinker]<sup>-1</sup> nel 2008 per gli inquinanti CO, NO<sub>x</sub> (asse ordinate a sinistra) e polveri PM (asse ordinate a destra) dovute al processo industriale di produzione del clinker ripartite per punto di emissione: forno cottura farina cruda (stima SME e stima minimo tecnico), raffreddatore clinker, essiccatoio calcare, mulini *pet coke* (stima da controlli alle emissioni - ARPAV - e da parametri di processo registrati dal sistema di controllo distribuito dell’impianto - DCS).

azoto ( $\text{NO}_x$  – grafico in alto a destra) e polveri (PM – grafico in basso a sinistra), le stime dei tre indicatori relativi triennio di esercizio 2006-2008. Inoltre sempre in Figura 5, a titolo esemplificativo solo per il 2008, viene riportato il dettaglio delle varie voci che definiscono il calcolo degli indicatori (cfr. tabella in basso a destra). Gli indicatori sono stati successivamente confrontati sia rispetto all'andamento temporale che rispetto gli standard di riferimento riportati nella letteratura tecnica di settore (BAT).

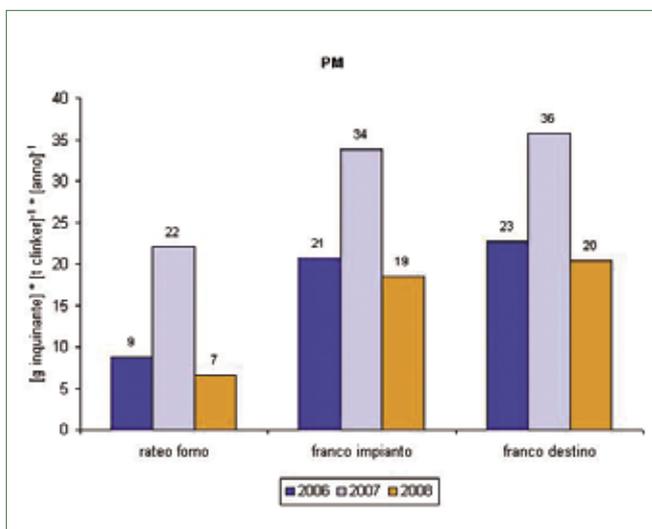
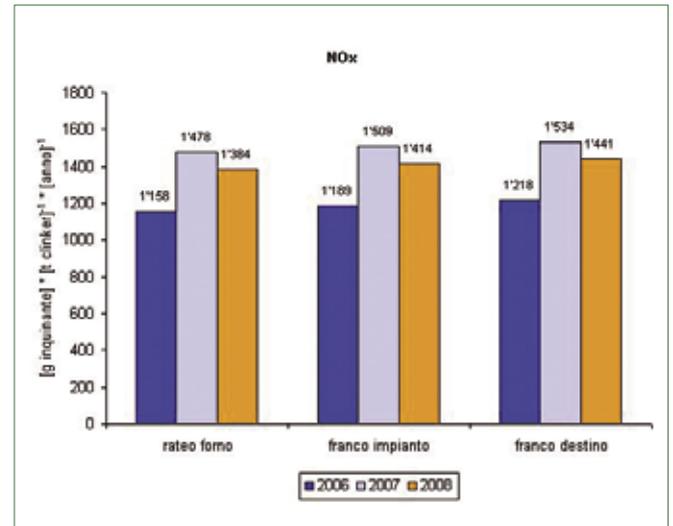
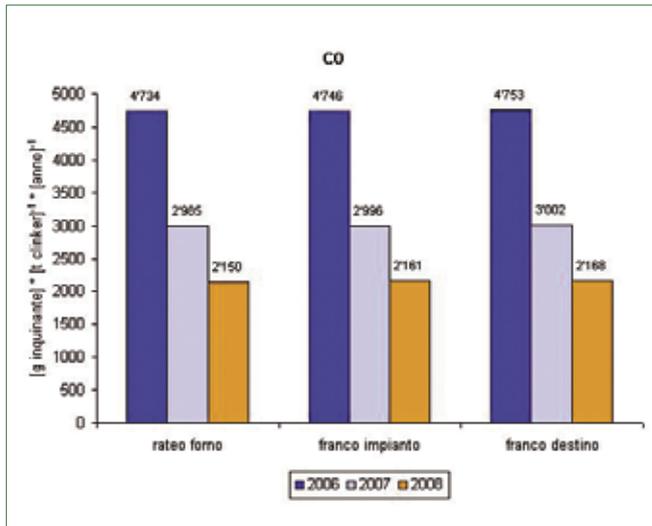
Dai grafici e dalla tabella in Figura 5 si osserva che:

- per il monossido di carbonio (CO – in alto a sinistra) tutti gli indicatori proposti evidenziano nel triennio 2006-2008 un significativo miglioramento delle prestazioni ambientali essenzialmente riconducibile ad una modifica impiantistica (“allungamento” dello stadio di precalcinazione) i cui effetti sono stati già discussi in dettaglio nei rapporti tecnici disponibili *on-line* sul sito ARPAV (cfr. siti web consultati) ed in una specifica pubblicazione a stampa (Bressan *et al.*, 2011 - b);
- per gli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$  - in alto a destra) l'andamento temporale di tutti gli indicatori nel triennio 206-2008 è sostanzialmente stabilizzato su valori medi annuali molto vicini;
- per le polveri (PM – in basso a sinistra) relativamente al triennio considerato si evidenzia nel 2007, in particolare per l'indicatore *rateo forno*, valori significativamente superiori dovuti ad un difetto nella fornitura iniziale del filtro a maniche (valori che risultano comunque al di sotto del valore di garanzia del filtro e che non hanno mai comportato un superamento del limite autorizzato); il difetto, che ha provocato un danneggiamento meccanico ed una precoce usura del tessuto filtrante, è stato eliminato nel corso del 2008 con la completa sostituzione di tutti gli elementi filtranti e dei componenti responsabili dell'usura anomala garantendo così, come anche evidente dai grafici, un sostanziale rientro dei valori su livelli paragonabili a quelli del 2006;
- l'indicatore *rateo forno* per CO e  $\text{NO}_x$  (in alto a sinistra e a destra) definisce in modo quasi esclusivo (99%) le emissioni complessive annuali per unità di prodotto finito; invece, per PM il *rateo forno* conteggia solo una frazione limitata delle emissioni annue complessive (circa 40%) essendo molto rilevante il contributo relativo di altri punti convogliati (grafico in basso a sinistra e tabella in basso a destra per dettaglio 2008);
- sia l'indicatore *franco impianto* che *franco destino*, per quanto già detto con la sola significativa eccezione delle polveri (PM),

rendicontano in confronto al *rateo forno* una frazione aggiuntiva estremamente limitata del carico ambientale annuo complessivo.

Relativamente al confronto degli indicatori di *performance* con gli standard di riferimento nella letteratura tecnica di settore c'è da rilevare che quasi la totalità dei documenti si riferisce a quanto è stato definito in questo lavoro come *rateo forno* cioè, le emissioni atmosferiche dal forno di cottura per massa unitaria di clinker prodotto. Rispetto al confronto con questi standard c'è da rilevare che:

- per il monossido di carbonio (CO), il valore medio annuale del *rateo forno* dei cementifici “europei” si attesta entro un intervallo piuttosto ampio compreso tra 460 e 4600 grammi di CO per tonnellata di clinker (BRef, 2010); il corrispondente valore medio per il cementificio di Pederobba (nel 2008 circa 2150 g/t clinker) è sostanzialmente “centrale” rispetto a questi due estremi di riferimento e, quindi, ampiamente entro la “media” di settore;
- per gli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ), gli standard sono molto variabili in funzione del *layout* impiantistico e delle fonti dati considerate: ad esempio, per forni con precalcinatore 2100 g/t clinker (Rother, 2006), per forni “medi europei” da 334 a 4670 g/t clinker (BRef, 2010), per forni “americani” con precalcinatore 1700 g/t clinker (EPA, 1994); il valore medio annuale del cementificio di Pederobba è per il 2008 pari a circa 1380 g/t clinker, cioè in linea con questi riferimenti che, nel caso degli ossidi di azoto, presuppongono delle ricadute ambientali riconducibili esclusivamente ad effetti a breve termine dovuti a specifiche condizioni meteorologiche (Bressan *et al.*, 2011 - a); c'è, inoltre, da considerare che sono state realizzate da parte del cementificio alcune importanti modifiche di processo per il contenimento delle emissioni di  $\text{NO}_x$ , tra cui l'utilizzo di un bruciatore low- $\text{NO}_x$ , oltre all'allungamento della sezione di precalcinazione come descritto in precedenza;
- l'utilizzo degli pneumatici fuori uso come combustibile alternativo ha evidenziato in modo chiaro un “effetto antagonista” sulle emissioni di  $\text{NO}_x$  (diminuzione) e CO (aumento), così come discusso in dettaglio nei rapporti tecnici disponibili *on-line* sul sito ARPAV (cfr. siti web consultati) ed in una specifica pubblicazione a stampa (Bressan *et al.*, 2011 - b);
- per le polveri (PM), i valori medi annuali dei forni “europei” variano di circa tre ordini di grandezza: da un minimo di 0.62 ad un massimo di 522 g/t clinker (BRef, 2010); considerata l'estrema variabilità dei dati e la difficoltà di trarre considerazioni utili dal



#	punto / fonte emissione anno 2008	[g inq.] * [t clinker] <sup>-1</sup>		
		CO	NO <sub>x</sub>	PM
1	forno (SME)	2148.81	1380.11	6.61
2	forno (min tecnico)	1.05	3.41	0.02
3	raffreddatore	0.00	0.00	8.77
4	essiccatoio	0.60	0.10	0.80
5	mulini	-	-	0.04
6	attività cava	6.90	15.93	1.27
7	traffico entrata impianto	3.83	14.94	1.06
8	traffico uscita impianto	6.84	26.66	1.89
Σ 1:2	"rateo forno"	2149.86	1383.53	6.63
Σ 1:7	"franco impianto"	2161.18	1414.50	18.56
Σ 1:8	"franco destino"	2168.02	1441.15	20.45

punto di vista operativo è comunque evidente che il valore medio annuale di Pederobba nel 2008 (circa 7 g/t clinker) si colloca all'estremo inferiore di questo intervallo, cioè nella prospettiva di un impatto ambientale limitato come ampiamente argomentato dai rapporti tecnici disponibili on-line sul sito ARPAV (cfr. siti web consultati).

### Conclusioni

Il presente lavoro ha messo in luce alcuni significativi elementi di valutazione rispetto all'impatto ambientale del ciclo di produzione industriale del clinker di cemento e all'utilizzo di uno specifico approccio di analisi. Riassumiamo per punti le principali conclusioni:

- le fasi del processo industriale che “dalla culla alla tomba” concorrono alla produzione del clinker di cemento causano delle emissioni atmosferiche significativamente differenti dal punto di vista quantitativo, delle modalità di rilascio e dei possibili target e quindi dei conseguenti effetti sull'ambiente e sulla salute;

l'analisi del ciclo di vita di un determinato prodotto, anche se in questo caso esclusivamente incentrato sulle emissioni atmosferiche di monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) e polveri (PM), permette di individuare in modo ripercorribile le fasi del processo produttivo che costituiscono una significativa fonte di pressione ambientale e, quindi, permette di focalizzare l'attenzione sulle possibili azioni di mitigazione da assumere come prioritarie in uno specifico contesto ambientale;

- la stima delle emissioni atmosferiche dall'attività estrattiva di materie prime ha evidenziato i limiti dovuti alla mancanza di consolidati e ben condivisi riferimenti metodologici; considerata comunque la forte incertezza di stima associata alle emissioni dei mezzi off-road operanti nell'attività di miniera c'è da rilevare che, anche nel caso peggiore, il carico inquinante per unità di prodotto finito risulta sostanzialmente limitato; di difficile quantificazione tecnica risulta il sollevamento ed

**Figura 5**  
Stima degli indicatori di performance (rateo forno, franco impianto, franco destino) per il triennio 2006-2008 e gli inquinanti CO, NO<sub>x</sub> e polveri PM [g inquinante]\*[t clinker]<sup>-1</sup>\*[anno]<sup>-1</sup>; nella tabella in basso a destra viene riportato a titolo esemplificativo per il 2008 il dettaglio delle componenti che definiscono il calcolo degli indicatori.

il trasporto meccanico delle polveri dovuto all'attività di disboscamento, scorticatura, scavo, frantumazione e stoccaggio provvisorio del minerale;

- le emissioni da trasporto su strada dei materiali in ingresso ed in uscita all'impianto, la cui metodologia di stima è significativamente consolidata, hanno evidenziato un contributo limitato rispetto al carico annuale di inquinante per unità di prodotto finito; rispetto a queste stime c'è semmai da rilevare che, considerato tutto il materiale trasportato l'emissione dovuta ai flussi in uscita è circa tre volte superiore a quella in entrata;
- le emissioni atmosferiche convogliate rappresentano in termini quantitativi il contributo più rilevante del carico annuale di inquinante per unità di prodotto finito; le emissioni dal forno di cottura della farina, sia per il monossido di carbonio (CO) che per gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), sono pressoché esclusive del carico inquinante totale (99%); invece, per le polveri (PM) costituiscono solo una frazione limitata (41%) perché è necessario considerare il contributo significativo di altri punti di emissione quali il raffreddatore del clinker (circa il 54%); per tutti gli inquinanti le emissioni in regime di "minimo tecnico" d'impianto (avvio, spegnimento e transitori) rappresentano solo una frazione trascurabile del totale;
- i tre indicatori di *performance* ambientale proposti (*rateo forno*, *franco impianto*, *franco destino*) misurano in termini cumulativi l'impatto complessivo delle emissioni atmosferiche per unità di clinker prodotto cioè misurano il carico emissivo associato alle varie fasi del ciclo di vita del clinker di cemento;
- l'indicatore *rateo forno*, che considera solo le emissioni originate dal processo di cottura della farina è risultato per gli inquinanti gassosi monossido di carbonio (CO) ed ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) rendere conto in modo pressoché totale del carico inquinante per unità di prodotto finito;

- sia l'indicatore *franco impianto*, che considera anche le emissioni da trasporto in entrata all'impianto e quelle dovute ad altri punti di emissione convogliati, che l'indicatore *franco destino*, che somma tutte le emissioni, incluso quelle da trasporto in uscita all'impianto fino a destinazione finale, contabilizzano solo una frazione aggiuntiva (rispetto al *rateo forno*) sostanzialmente molto limitata dell'impatto ambientale per unità di prodotto finito per gli inquinanti monossido di carbonio (CO) ed ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>); invece, tali considerazioni non sono applicabili alle polveri (PM) perché è necessario valutare il contributo molto significativo di almeno un altro punto di emissione convogliato (raffreddatore clinker) cioè, in sintesi, le informazioni fornite dall'indicatore definito *franco impianto*;
- l'utilizzo di indicatori di *performance* è un esercizio fondamentale per monitorare, rispetto a tutti gli inquinanti considerati, il contributo delle differenti fonti di emissione evitando generalizzazioni fuorvianti che impediscono una corretta definizione delle possibili azioni di mitigazione ambientale;
- gli indicatori di *performance* valutano l'impatto ambientale in modo trasparente e ripercorribile sia rispetto al trend storico del processo industriale che al contingente layout tecnico, gestionale ed impiantistico di analoghe realtà produttive; l'utilizzo sistematico di metodologie e strumenti di *benchmarking* stimola ed integra i processi aziendali di apprendimento e cambiamento e, allo stesso tempo, spinge verso l'efficacia e l'efficienza dei processi industriali grazie al rinnovamento della cultura ambientale d'impresa attraverso un costante confronto con l'esterno.

Per concludere, l'approccio di valutazione utilizzato, al di là delle incertezze di stima mai del tutto eliminabili, garantisce la tracciabilità degli impatti ambientali di una determinata attività produttiva cioè, in estrema sintesi, rende la valutazione trasparente a tutti gli attori del processo decisionale (gestori d'impianto, progettisti, autorità di controllo, professionisti, popolazione locale e cittadini genericamente interessati) coinvolti a vario titolo nel miglioramento delle prestazioni ambientali di uno specifico contesto produttivo ed ambientale.

### Siti Web Consultati

ARPAV: Nome pagina: *Certificazioni ambientali*. Indirizzo: [http://www.arpa.veneto.it/certificazioni\\_ambientali/html/certificazioni\\_ambientali.asp](http://www.arpa.veneto.it/certificazioni_ambientali/html/certificazioni_ambientali.asp)

Nome pagina: *Comparto industriale del cemento e impatti sull'ambiente*. Indirizzo: [http://www.arpa.veneto.it/chi\\_e\\_arpa/html/comparto\\_industriale\\_cemento.asp](http://www.arpa.veneto.it/chi_e_arpa/html/comparto_industriale_cemento.asp)

### Ringraziamenti

L'Amministrazione del Comune di Pederobba (Treviso) per aver reso possibile la realizzazione del progetto complessivo di valutazione ambientale integrata che comprende anche gli aspetti trattati nel presente lavoro, e l'Industria Cementi Giovanni Rossi S.p.A. (stabilimento di Pederobba) per la sempre fattiva collaborazione.

## Bibliografia

ANPA, 2002. **Manuale dei fattori di emissione nazionale**. A cura di: G. Bini, S. Magistro. Obiettivo: OB06 – *Raccolta, adeguamento e integrazione delle informazioni*, Task OB 06.12b – Manuale dei fattori di emissione. Centro Tematico Nazionale Atmosfera Clima ed Emissioni in Aria.

BAFU, 2008. **Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors**. *Studie für die Jahre 1980–2020*. Bundesamt für Umwelt. Autoren: Schäffeler U. und Keller M. <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01003/index.html?lang=de>

Bressan, M., Elvini, E., Liguori, F., Pillon, S., Rosa M., 2011 (a). **Stima di dispersione degli inquinanti atmosferici emessi da un cementificio**. *IA Ingegneria Ambientale*, vol. XL, n. 2, marzo-aprile 2011.

Bressan, M., Rosa M., De Dominicis D., Silvestri P., Tomiato L., 2011 (b). **Un approccio statistico alla valutazione integrata delle emissioni atmosferiche di un cementificio in provincia di Treviso**. Il caso studio di Pederobba. *BEA, Bollettino degli Esperti Ambientali*, 4/2011, in corso di pubblicazione.

BRef, 2010. **Reference document on best available techniques in the cement, lime and magnesium oxide manufacturing industries**. May 2010. European Commission Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies, 2010, p. XXII+461. [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/brefdownload/download\\_CLM.cfm](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/brefdownload/download_CLM.cfm)

Cementirossi S.p.A., 2009. **Analisi ambientale della cementeria di Pederobba**. Rapporto tecnico. Industria Cementi Giovanni Rossi S.p.A., Stabilimento di Pederobba.

EEA, 1997. **Life Cycle Assessment (LCA)**. *A guide to approaches, experiences and information sources*. European Environment Agency. Environmental Issues Series: 6.

EEA, 2006. **Atmospheric Emission Inventory Guidebook**, European Environment Agency, EMEP / CORINAIR, Copenhagen, <http://www.eea.europa.eu/publications/EMEP/CORINAIR4>

EEA, 2009. **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook**. EEA, European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>

EPA, 2004. **Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Compression-Ignition**. Report No. NR-009c, Revised April 2004, *Assessment and Standards Division, EPA, Office of Transportation and Air Quality*.

GTR cemento, 2004. **Linee guida per l'individuazione**

**e delle migliori tecniche disponibili. Produzione di cemento**. Gruppo Tecnico Ristretto “*Produzione di cemento e altre attività di prodotti minerali*” nominato dalla Commissione istituita con Decreto Ministeriale del 19/11/2002, p. 112.

Horne, R., Grant T., Verghese K., 2009. **Life cycle assessment: principles, practice and prospects**. CSIRO Publishing, Australia.

ISPRA, 2009. **La disaggregazione a livello provinciale dell'inventario nazionale delle emissioni**. Anni 1990-1995-2000-2005. Autori: R. De Lauretis, A. Caputo, R. Dánica Cándor, E. Di Cristofaro, A. Gagna, B. Gonella, F. Lena, R. Liburdi, D. Romano, E. Taurino, M. Vitullo. Rapporti 92/2009, ISPRA, Istituto Superiore per la protezione e la ricerca ambientale.

Lambrecht U., Helms H. and Knörr W., 2007. **Air pollutant emissions of combustion engines in off-road equipment and machinery**. (The forgotten sector). IFEU - Institut für Energie und Umweltforschung GmbH Heidelberg. Presentation at “*Expert meeting on the Improvement of Transport Emission Inventories 19th November 2007*”, JRC Ispra, Italy” [http://transportpanel.jrc.ec.europa.eu/pdf/jrc\\_meeting/2007\\_11\\_Lambrecht.pdf](http://transportpanel.jrc.ec.europa.eu/pdf/jrc_meeting/2007_11_Lambrecht.pdf)

Lükewille A., Bertok I., Amann M., Cofala J., Gyarfás F., Heyes C., Karvosenoj N., Klimont Z. and Schöpp W., 2001 **A framework to estimate the potential and costs for the control of fine particulate emissions in Europe**. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), IR-01-023, Laxenburg, Austria.

Ntziachristos L. and Samaras Z., 2000. **COPERT III, Computer Program to Calculate Emission from Road Transport, Methodology and Emission Factors** (version 2.1)”, European Environment Agency, November 2000.

Ntziachristos, L. 2003. **Road vehicle tyre & brake wear, & road surface wear**. Activities 070700-070800, Emission Inventory Guidebook, Aristotle University Thessaloniki / Lab of Applied Thermodynamics, Thessaloniki, Greece, Version. 1.0, August 2003. <http://www.aeat.co.uk/netcen/airqual/TFEI/reports.htm>

Remmen A., Jensen A.A. and Frydendal J., 2007. **Life cycle management – a business guide to sustainability**. United Nations Environment Programme (UNEP) and Danish Standards, Paris, France.

Rother W., 2006. Exhaust gas emissions. **Available control technology for gaseous emissions in cement plants**. Information for cement and lime BREF 2001. *International Cement Review* 1: 39-43.