



APAT

AGENZIA PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE E PER I SERVIZI TECNICI

**ANALISI DELLE POSSIBILITÀ
TECNICHE – ECONOMICHE DI RICONVERSIONE
DELL'AMIANTO AI SENSI DEL
D.M. 248 DEL 29 LUGLIO 2004**

Dott. Ing. Francesca Serafini

Tutor: Dott. Ing. Giuseppe Marella
Cotutor: Dott.ssa Flavia Saccomandi

ABSTRACT

Amianto o asbesto sono i termini con i quali si indica un minerale silicatico, caratterizzato da abito fibroso, noto per la sua pericolosità e causa di gravi patologie cliniche, conseguenti all'inalazione delle fibre. L'utilizzo diffuso e protratto nel tempo che è stato fatto di questo minerale nelle sue più diverse applicazioni industriali, comporta che oggi l'operazione di bonifica, condotta con lo scopo di eliminare o rendere innocui i materiali di amianto, risulti complessa e richieda ancora molto tempo; inoltre l'operazione di bonifica implica, spesso, la produzione di un rifiuto pericoloso, ovvero l'amianto rimosso.

Alla luce del recente decreto 248 del 29 luglio 2004, regolamento relativo alla determinazione e disciplina delle attività di recupero dei prodotti e beni di amianto e contenenti amianto, si individuano due strade percorribili per la gestione dell'amianto rimosso. La prima, tradizionale, consiste nella messa a dimora del MCA (materiali contenenti amianto) in discarica per rifiuti pericolosi, a seguito del rispetto di precise procedure; l'altra, un'alternativa interessante dal punto di vista ambientale, prevede l'inertizzazione del materiale, operando una modifica al livello della struttura cristallina ed ottenendo dei silicati non più fibrosi e del tutto innocui. Adottando questa procedura è possibile ottenere, partendo dal rifiuto amianto, una nuova materia prima utilizzabile nell'industria della produzione di leganti idraulici, refrattari, inerti...

I trattamenti di inertizzazione si differenziano in sette categorie: modificazione chimica, modificazione meccanochimica, litificazione, vetrificazione, vetroceramizzazione, mitizzazione pirolitica, Produzione di clinker, ceramizzazione, a seconda della tipologia del processo, che può essere di natura prevalentemente meccanica, termica o chimica e dei prodotti ottenibili.

La realizzazione di questi impianti di trattamento è subordinata a vincoli tecnici ed economici. Le fasi del processo prevedono la lavorazione del minerale pericoloso, spesso presente in associazione con altri materiali, e, quindi, necessitano operazioni di separazione, di triturazione e preparazione dell'amianto prima che questo venga sottoposto alle effettive procedure di inertizzazione; è, nel contempo, opportuno che le operazioni richieste siano condotte in depressione o in condizioni bagnate, per impedire la dispersione

di fibre, mentre l'emissione nell'ambiente dei prodotti dell'eventuale combustione o delle acque utilizzate richiede una debita attenzione.

Le molteplici possibilità di trattamento dei RCA, (rifiuti contenenti amianto), aprono interessanti prospettive per il futuro rendendo possibile un approccio alla problematica dei rifiuti più rispettoso dell'ambiente, nello stesso tempo favorendo un riutilizzo del minerale in nuove applicazioni industriali, compatibilmente con i costi richiesti dai trattamenti. Questi sono variabili ed il conseguente vantaggio economico di un processo di inertizzazione è da analizzare caso per caso, valutabile in base ad un confronto effettuato con i corrispondenti prezzi della messa a discarica, con il risultato della validità, quasi certa, di tali procedure nel caso l'amianto sia presente in concomitanza con altre sostanze pericolose.

Vengono descritti i principi alla base dei trattamenti di inertizzazione possibili e analizzati aspetti tecnici e economici di alcuni processi.

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
1. AMIANTO E BONIFICA.....	2
1.1 Struttura chimica dell'amianto.....	2
1.2 Utilizzo e proprietà dell'amianto.....	3
1.3 Le operazioni di bonifica ed il rifiuto amianto.....	8
2. DESTINAZIONE DEL MCA IN DISCARICA.....	12
2.1 Tipologie di discarica.....	12
2.2 Problematiche inerenti le discariche.....	16
3. IL DECRETO N. 248.....	18
3.1 Trattamento dei rifiuti contenenti amianto.....	18
3.1-1 Trattamenti che hanno lo scopo di ridurre il rilascio di fibre.....	19
3.1-2 Trattamenti che comportano una totale trasformazione delle fibre di amianto ...	21
3.1-2.a Modificazione Chimica.....	24
3.1-2.b Modificazione meccanochimica.....	25
3.1-2.c Litificazione.....	25
3.1-2.d Vetrificazione.....	26
3.1-2.e Vetrocera mizzazione.....	27
3.1-2.f Mitizzazione pirolitica.....	28
3.1-2.g Produzione di clinker.....	29
3.1-2.h Cera mizzazione.....	30
3.1-2.i Criteri di omologazione per i materiali inerti ottenuti a seguito di trattamenti.....	33
4. ALCUNI TRATTAMENTI DI INERTIZZAZIONE.....	35
5. CONCLUSIONI.....	58
6. BIBLIOGRAFIA.....	59

INTRODUZIONE

L'attenzione dell'opinione pubblica e del legislatore, in Italia, nei confronti dei materiali contenenti amianto va ricondotta alla Legge 27 marzo 1992, n. 257, norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto, capostipite di una lunga legislazione in materia, in cui si ritrovano molte indicazioni già presenti nelle norme statunitensi. Negli Stati oltre oceano sono l'EPA (Environmental Protection Agency) e l'OSHA (Occupational Safety and Health Administration) i due enti che si interessano della problematica amianto in relazione all'aspetto tecnico-gestionale, quale l'emissione di fibre nell'aria esterna, le operazioni di rimozione e bonifica dell'amianto, e all'aspetto medico, ovvero la tutela della salute dei lavoratori, che possono entrare in contatto con tale materiale pericoloso. L'EPA già nell'ottobre del 1986 poneva l'attenzione sulla presenza di materiali friabili contenenti amianto in luoghi pubblici ed in particolare negli edifici scolastici, tramite l'emissione di regolamenti che prevedevano un'operazione di ispezione e di intervento, per mettere al bando la maggior parte dei prodotti contenenti amianto solo qualche anno più tardi.

Oggi con l'acronimo MCA vengono indicati i materiali contenenti amianto: accertatane la pericolosità e messi al bando tali materiali, viene condotta ormai ovunque una campagna di bonifica per eliminare e/o mettere in sicurezza i materiali asbestosi finora utilizzati. Si è fatto strada conseguentemente un nuovo problema ambientale: dove e come destinare i materiali contenenti amianto?

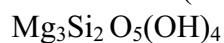
AMIANTO E BONIFICA

1.1 Struttura chimica dell'amianto

Con il termine amianto o asbestos si indicano ben sei tipi diversi di silicati fibrosi, ognuno individuato dalla propria composizione chimica e riconducibili a due famiglie di minerali: il **serpentino** e l' **anfibolo**.

*Amianto di **serpentino*** (silicato di magnesio):

-CRISOTILO (asbesto bianco)



*Amianto di **anfibolo*** (silicati di calcio, ferro, magnesio, sodio):

-CROCIDOLITE (asbesto blu)



-AMOSITE (asbesto bruno)



-ACTINOLITE Ca_2



- TREMOLITE



-ANTOFILLITE



L'elemento costitutivo di tali minerali è il tetraedro SiO_4^{--} , in cui la posizione centrale è occupata dall'atomo di silicio mentre i vertici sono occupati da quattro ossigeni. Da un punto di vista chimico il gruppo SiO_4^{--} è un anione che deve essere neutralizzato da cationi. Negli anfiboli, una delle due famiglie del minerale amianto, i tetraedri SiO_4^{--} mettono in comune due o tre vertici e formano nastri di tetraedri SiO_4^{--} , al cui centro c'è un gruppo ossidrilico OH^- ; i diversi nastri sono collegati tra loro da cationi, che legano gli ossigeni dei tetraedri SiO_4^{--} e neutralizzano elettricamente la struttura. Questa conformazione rende il minerale molto resistente alla trazione; al contrario, lateralmente le sole forze di Wan-Der-Walls mantengono unite le fibre, che, quindi, tendono facilmente a separarsi. Nei fillosilicati invece i tetraedri SiO_4^{--} mettono in comune tre vertici a formare fogli di tetraedri SiO_4^{--} , elettricamente neutralizzati da fogli di cationi.

Questi minerali presentano la caratteristica tendenza delle fibre a dividersi longitudinalmente in un numero altissimo di fibrille con diametro sempre più piccolo fino ad essere assolutamente invisibili ad occhio nudo. Proprio questo aspetto strutturale, non presente in altri minerali che si spezzano solo trasversalmente, rende l'amianto estremamente pericoloso poiché le dimensioni considerevolmente piccole delle fibre facilitano la penetrazione nell'organismo umano causando malattie gravissime dell'apparato respiratorio (asbestosi, cancro ai polmoni ed alla pleura). Per dare una idea dell'estrema finezza delle fibre basti pensare che in un centimetro lineare si possono affiancare 335.000 fibre di amianto, stesso spazio che viene occupato da "solo" 250 capelli, 500 fibre di lana, 1300 fibre di nailon.

Gli effetti nocivi delle fibre inalate dipendono da fattori fisici e chimici. La superficie delle fibre di amianto, e in particolare il ferro, svolge un ruolo fondamentale nella tossicità.

La crocidolite, contiene fino al 29% di ferro, il quale, quando presente sulla superficie in basso stato di coordinazione, origina centri altamente reattivi e ciò può provocare la formazione di radicali liberi che, danneggiando il DNA, inducono forme tumorali.

Esperimenti in vitro hanno dimostrato che la rimozione del ferro riduce la pericolosità dell'amianto diminuendo il potenziale di generare radicali e di danneggiare il DNA.

La capacità di microrganismi, che necessitano di ferro per il proprio metabolismo, di recuperare questo metallo dall'ambiente è stata studiata dal CNR, Consiglio Nazionale delle Ricerche, allo scopo di individuare in particolare nei funghi importanti artefici del biorisanamento. Si è osservato come alcune specie di fungo estraggono ancora ferro dopo più di sette settimane di incubazione e possono formare una rete di fini filamenti che immobilizzano le fibre di amianto riducendo la loro dispersione nell'ambiente. In questa ottica una progressiva estrazione del ferro dalle fibre disperse nell'ambiente, ad opera di funghi naturalmente presenti o introdotti, porterebbe a cambiamenti nella natura della superficie delle fibre che risulterebbe verosimilmente in una riduzione del loro potenziale cancerogeno.

1.2 Utilizzo e proprietà dell'amianto

Molteplici sono le proprietà fisico-chimiche di questo materiale che ne hanno motivato un larghissimo impiego: la struttura fibrosa, di cui si è detto, è quella che conferisce sia una notevole resistenza meccanica che una alta flessibilità; inoltre l'amianto resiste al calore,

all'azione di agenti chimici e biologici, all'abrasione e all'usura; è facilmente filabile e può essere tessuto. Si sono contati oltre duemila prodotti diversi in cui tale minerale è stato impiegato interessando i più vari ambiti lavorativi, grazie anche alla facilità con cui si lega ai diversi materiali da costruzione (calce, gesso, cemento) e con alcuni polimeri (gomma, PVC).

L'amianto è stato utilizzato tal quale, sotto forma di fibre, per ottenerne impasti applicabili a spruzzo da utilizzare quale rivestimento in grado di impedire il surriscaldamento e quindi il collasso termico di strutture metalliche. Il minerale da solo o legato in matrice friabile è stato utilizzato come isolante termico, come guarnizione di tenuta in impianti chimici, rivestimenti isolanti di tubazioni o caldaie .

L'amianto è dotato inoltre di proprietà fonoassorbenti.

Come materiale estremamente versatile ed a basso costo ha avuto estese e svariate applicazioni industriali, edilizie e in prodotti di consumo, prodotti in cui le fibre si possono presentare libere o debolmente legate, dando luogo all'amianto friabile, oppure possono essere fortemente legate in una matrice stabile e solida, che costituisce l'amianto compatto, come nel caso del cemento-amianto o il vinil - amianto.

Una classificazione dei materiali con presenza di amianto, condotta in base il loro utilizzo, porta ad individuare i seguenti gruppi:

- Cemento-amianto: materiale ottenuto da miscele di cemento Portland, amianto di crisotilo, amianto di anfibolo crocidolite e/o amosite e acqua. I cementi-amianti si possono distinguere nelle seguenti tipologie:
 - tramezzi, rivestimenti di interni ed esterni
 - coperture di tetti
 - involucri motori e di apparecchiature elettriche
 - condutture di acqua potabile, fognature
 - condutture per gas e liquidi speciali
 - manufatti artistici
 - condutture in pressione
- Materiali di attrito: tali materiali provengono principalmente dal settore trasporti e comprendono pastiche di freni, dischi e ferodi, frizioni, ceppi dei freni per l'industria automobilistica e ferroviaria.

- Pannellature e cartoni di amianto : questo gruppo include una vasta gamma di prodotti, che si differenziano per struttura, composizione chimica, materiali usati ed applicazioni, che possono essere distinte nelle seguenti tipologie:
 - pannelli in amianto-gesso
 - pannelli in amianto-quarzo
 - pannelli in amianto + fibre organiche
 - pannelli in amianto + malte di gesso o calce
 - pannelli o pavimentazioni in amianto e resine organiche
 - ceramiche per caldaie, rivestimenti di stufe e caloriferi
 - coibentazioni per tetti, soffittature
 - pareti e porte tagliafuoco
 - guarnizioni, filtri etc.
 - linoleum
- Corde e tessuti : provengono per lo più da impianti termici ed elettrici, dove sono stati impiegati per:
 - rivestimenti di cavi, tubi etc.
 - indumenti protettivi
 - tappezzeria
 - protezioni antifiamma
 - nastri per la coibentazione di cavi elettrici
- Materiali a spruzzo: sono materiali molto omogenei per composizione e caratteristiche chimiche e mineralogiche; in essi l'amianto (spesso di anfibolo) è presente normalmente in quantità superiori all'85%, mescolate con gesso, calce o resine organiche o altri leganti.
- Materiali vinilici : mattonelle e prodotti per pavimentazioni in vinile con intercapedini di carta di amianto PVC e pastiche rinforzate con amianto, mastici, sigillanti e stucchi adesivi contenenti amianto.
- Carte e cartoni : materiali formati da pasta di amianto e cellulosa o inerti inorganici, usati come isolanti elettrici e termici o acustici.
- Coibentazioni morbide: sono essenzialmente feltri e materassini di amianto (in crisotilo o crocidolite) usati nell'industria ferroviaria ed in casi rari nell'industria tessile

- Materiali compositi : questo gruppo di materiali comprende numerose tipologie di materiali, dalle colle agli stucchi, agli asfalti.

<u>Tipo di materiale</u>	<u>Note</u>	<u>Friabilità</u>
Ricoprimenti a spruzzo e rivestimenti isolanti	Fino all'85% circa di amianto. Spesso anfiboli (amosite, crocidolite): prevalentemente amosite spruzzata su strutture portanti di acciaio o su altre superfici come isolante termoacustico	Elevata
Rivestimenti isolanti di tubazioni o caldaie	Per rivestimenti di tubazioni tutti i tipi di amianto, talvolta in miscela al 6-10% con silicati di calcio. In tele, feltri, imbottiture in genere al 100%	Elevato potenziale di rilascio di fibre se i rivestimenti non sono ricoperti con strato sigillante uniforme e intatto
Funi, corde, tessuti	In passato sono stati usati tutti i tipi di amianto. In seguito solo crisotilo al 100%	Possibilità di rilascio di fibre quando grandi quantità di materiali vengono immagazzinati
Cartoni, carte e prodotti affini	Generalmente solo crisotilo al 100%	Sciolti e maneggiati, carte e cartoni, non avendo una struttura molto compatta sono soggetti a facili abrasioni e ad usura
Prodotti in amianto-cemento	Attualmente il 10-15% di amianto in genere crisotilo. Crocidolite e amosite si ritrovano in alcuni tipi di tubi e di lastre	Possono rilasciare fibre se abrasi, segati, perforati o spazzolati, oppure se deteriorati
Prodotti bituminosi, mattonelle in vinile con intercapedini di carta di amianto, mattonelle e pavimenti vinilici, PVC e plastiche rinforzate, ricoprimenti e vernici, mastici sigillanti, stucchi adesivi contenenti amianto	Dallo 0.5 al 2% per mastici, sigillanti adesivi, al 10-25% per pavimenti e mattonelle vinilici	Improbabile rilascio di fibre durante l'uso normale. Possibilità di rilascio di fibre se tagliati, abrasati o perforati

Tabella 1- Materiali di amianto

In base al parametro “friabilità” viene valutata la tendenza dei minerali a liberare fibre nell’ambiente; si definiscono ***friabili*** i materiali che possono essere sbriciolati o ridotti in polvere con la semplice pressione manuale e ***compatti*** i materiali duri che possono essere sbriciolati o ridotti in polvere solo con l’impiego di attrezzi meccanici (dischi abrasivi, frese, trapani). La dispersione delle sue fibre nell'ambiente circostante è aggravata da sollecitazioni di diversa natura: meccanica, eolica, da stress termico, o dilavamento. Nella tabella 1 vengono indicate friabilità e caratteristiche dei più comuni materiali contenenti amianto.

Nel 1988 il 98% della produzione mondiale di amianto era coperto dal crisotilo, la crocidolite e l’amosite insieme andavano a costituire solo l’1% del totale, mentre risultavano trascurabili le quantità degli altri minerali, pur essendo non meno pericolosi. L’amianto crisotilo è un minerale di serpentino di colore bianco composto da silicato di magnesio idrato, di formula chimica $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$. All’acqua presente nella struttura molecolare è associato il fenomeno della fibrosità del crisotilo, che, pertanto, non si presenta in abito cristallino ma fibroso, perché i caratteristici piani dei fillosilicati in questo caso sono curvati e si arrotolano su se stessi a formare spirali o tubi cilindrici concentrici. L’amianto crisotilo per le sue proprietà (è fibroso, poroso, resistente al fuoco), ha trovato largo impiego in campo industriale e per coibentazioni (è stato estratto fino a pochi anni fa in circa 5 milioni di tonnellate all’anno). In edilizia miscelato con il cemento è stato ampiamente impiegato nella fabbricazione di lastre ondulate (per coperture) e piane (divisorie, rivestimenti soffittature ecc.), in tubazioni, canne fumarie e altri svariati prodotti.

Se, quindi, il diverso aspetto sotto cui si presenta l’amianto non ne modifica la pericolosità, la differente composizione chimica (crisotilo, amosite, crocidolite...) può essere una discriminante per quanto riguarda i trattamenti di inertizzazione a cui esso può essere sottoposto e i relativi risultati ottenibili a seguito di tali procedure. Proprio per questo motivo, spesso, ciascuna operazione di trasformazione dell’amianto, è stata studiata prima, condotta poi, ponendo l’attenzione su di un preciso minerale, valutando soltanto dopo, le varianti che intervenivano nel processo qualora il minerale trattato fosse differente.



Figura 1- Macrofoto di una lastra in cemento amianto; le fibre di colore azzurro e biancastre-argentee indicano rispettivamente il contenuto fibroso tipo crocidolite e crisotilo.

1.3 Le operazioni di bonifica ed il rifiuto amianto

Il Decreto del Ministero della Sanità del 06/09/94 definisce le tecniche adottabili per lo svolgimento delle operazioni di bonifica; esse si concretizzano nelle azioni di:

- rimozione
- incapsulamento
- confinamento

del materiale contenente amianto.

Nella scelta del sistema tecnico di intervento sono oggetto di valutazione molteplici fattori, considerando, inoltre, che le norme impongono la rimozione dei materiali amiantati unicamente nel caso si debba procedere alla successiva demolizione o ristrutturazione delle strutture che li contengono.

Per fare un esempio pratico si può prendere in considerazione il caso dei manufatti di amianto contenuti nelle strutture edilizie, siano essi in matrice friabile o in matrice compatta. Essi di per sé non costituiscono un pericolo per gli abitanti dell'edificio o una fonte di inquinamento ambientale se non esiste una cessione di fibre di amianto all'ambiente ma è importante valutare lo stato delle coperture in cemento-amianto; infatti il

possibile degrado futuro può comportare un conseguente aumento di rischio di rilascio delle stesse fibre in un primo tempo ritenute innocue. I principali indicatori utili per condurre tale analisi sono allora la friabilità del materiale, lo stato della superficie ed in particolare l'evidenza di affioramenti di fibre, la presenza di sfaldamenti, crepe o rotture, l'esistenza di materiale friabile o polverulento in corrispondenza di scoli d'acqua, grondaie, o di materiale polverulento conglomerato in piccole stalattiti in corrispondenza dei punti di gocciolamento.

La *rimozione*, e la conseguente sostituzione dei materiali contenenti amianto, specie in edilizia, rappresenta sicuramente una soluzione preferibile in quanto definitiva per la bonifica di un ambiente soggetto al pericolo di emissione di fibre. Essa viene effettuata da parte di una ditta specializzata che deve ottemperare agli obblighi del D. lgs. 277/91 e al rispetto delle procedure indicate dal D.M. 06/09/94 .

C'è però da considerare che la rimozione implica la produzione del rifiuto contenente amianto, che, se non sottoposto ad ulteriori trattamenti, è destinato al conferimento in discarica. Tale luogo, anche se ben delimitato e protetto, rimane ad alto rischio per la notevole concentrazione delle fibre che sono potenzialmente disperse e costituisce un futuro problema di bonifica.

La ricopertura e l'*incapsulamento* si pongono come sistemi transitori, uniche alternative della rimozione e sostituzione, offrendo notevoli vantaggi dal punto di vista economico.

Come sistema transitorio permettono di:

- rimandare nel tempo l'onerosa sostituzione della copertura;
- permettere di stanziare e gestire meglio i finanziamenti occorrenti per un sistema definitivo;
- rimandare ad altri, decisioni di difficile accettazione;
- rimanere nei termini prescritti dalla legislazione;
- velocità d'intervento;
- mantenimento dell'attività lavorativa;
- diluire la massa di rifiuti;
- tamponare il problema dell'inquinamento ambientale senza soggiacere a forti costi.

L'incapsulamento è una tecnica che viene applicata in particolare alle lastre in cemento amianto con l'effetto di prolungarne notevolmente la durabilità, compromessa dall'azione di agenti atmosferici, smog, sbalzi di temperatura a cui esse sono inevitabilmente

sottoposte. L'incapsulamento si realizza tramite l'applicazione di particolari resine U.V. resistenti, penetranti, consolidanti, antivegetative, filmogene, autolavanti, ecc., che ripristinano l'integrità superficiale delle lastre, ne impediscono la carbonatazione ed inglobano le fibre di amianto in fase di distacco. Le resine, generalmente a base acrilica, metacrilica, elastomerica, poliuretanica, epossidica, richiedono, per poter essere applicate con successo sulle superfici da trattare, un necessario trattamento preliminare delle superfici stesse del manufatto, per garantire l'adesione del prodotto incapsulante. Il trattamento, inoltre, deve essere effettuato con attrezzature idonee che evitino la liberazione di fibre di amianto nell'ambiente.

Il sistema, ampiamente diffuso all'estero, sta riscontrando successo anche in Italia grazie all'economicità dell'intervento, la facilità di manutenzione e il proseguimento dell'attività lavorativa all'interno dell'edificio durante le fasi applicative. Il principale inconveniente è rappresentato dalla permanenza nell'edificio del materiale di amianto che richiede controlli periodici. L'eventuale rimozione di tale materiale, effettuata in tempi successivi, risulterà più difficoltosa.

L'intervento di *confinamento* nel caso di coperture in cemento amianto si ottiene realizzando una sopracopertura, ovvero installando una nuova copertura al di sopra di quella già esistente che viene lasciata in sede quando la struttura portante sia idonea a sopportare un carico permanente aggiuntivo. Pertanto l'adozione di tale soluzione richiede l'impiego di materiali che presentino idonee caratteristiche di leggerezza, infrangibilità, insonorizzazione, elevata durata nel tempo e dilatazione termica compatibile con il supporto in cemento-amianto. L'installazione comporta generalmente operazioni di foratura dei materiali di cemento-amianto, per consentire il fissaggio della nuova copertura e delle infrastrutture di sostegno, che determinano liberazione di fibre di amianto.

L'indirizzo attuale, di fronte alla problematica di "cosa fare del rifiuto amianto", ottenuto a seguito delle operazioni di bonifica, è quello di adottare la tecnica dell' "avvolgere e seppellire" ovvero, generalmente, lo smaltimento del materiale contenente amianto consiste nel ricorrere alla seguente procedura: bagnare con acqua l'amianto, sigillarlo in teli di plastica per procedere al trasporto in sicurezza e successivamente seppellirlo in discariche autorizzate.

Considerando che l'amianto non esiste come unico componente di un prodotto ma il suo utilizzo è dovuto all'associazione con altri materiali (si pensi ad esempio alle condotte rivestite da amianto o le fibre di vetro-amianto che aderiscono, in quanto filtri, ad elementi metallici), nelle operazioni di smaltimento si ha a che fare con grandi volumi di rifiuto e conseguentemente nasce la necessità di disporre di grandi discariche. Con il procedere dell'attività di bonifica, questa disponibilità progressivamente viene meno per cui sono visti sempre con maggiore interesse quei trattamenti che possono aprire una strada alternativa al conferimento in discarica o comunque comportino una riduzione del volume dei RCA (rifiuto contenente amianto).

Le tecnologie sviluppate dalla ricerca hanno come obiettivo convertire l'MCA in materiale non pericoloso: la pericolosità dell'amianto, come è ben noto, non è associata alla sua composizione chimica, ma alla struttura che esso presenta, ovvero alla presenza di fibre che possono essere inalate. Le tecniche di inertizzazione dell'amianto prevedono allora una modifica della struttura cristallina per ottenere un prodotto amorfo.

DESTINAZIONE DEL MCA IN DISCARICA

2.1 Tipologie di discarica

Le discariche possono essere ricondotte a tre tipologie fondamentali:

- per rifiuti inerti
- per rifiuti pericolosi
- per rifiuti non pericolosi

In base al decreto del 13 marzo 2003-Criteri di Ammissibilità dei rifiuti in discarica- i rifiuti di amianto o contenenti amianto possono essere conferiti nelle ultime due tipologie di discarica menzionate.

In particolare è ammesso il

- a) conferimento in discarica per rifiuti pericolosi, dedicata o dotata di cella dedicata;
- b) conferimento in discarica per rifiuti non pericolosi, dedicata o dotata di cella dedicata
 - per i rifiuti individuati dal codice CER 17 06 05
 - per altri rifiuti contenenti amianto, purché siano sottoposti ad opportuni processi di trattamento.

Tali processi sono volti al contenimento del potenziale inquinante dei RCA e sono riconducibili a tre tipologie :

- 1) Stabilizzazione - solidificazione in matrici stabili e non reattive
- 2) Incapsulamento
- 3) Trattamento con modificazione della struttura cristallina

A seguito di tali trattamenti la norma richiede il rispetto dei valori assunti da precisi parametri, come da tabella1 perché sia ammissibile il conferimento in discarica per rifiuti non pericolosi.

Parametri	Valori
Contenuto di amianto (% in peso)	$\leq 0,1$
Densità apparente (g/cm ³)	> 2
Indice di rilascio	> 50
Indice di rilascio	$< 0,6$

Tabella 1

Tuttavia la norma prevede una deroga da tali controlli qualora il trattamento adottato preveda una modificazione della struttura cristallina e sia di tipo termico ed i rifiuti così trattati non contengono più amianto in quantità misurabili con le tecnologie analitiche correnti. Il recente Decreto 29 luglio 2004 n. 248 pone una classificazione dei rifiuti contenenti amianto in base alla loro provenienza e natura. A ciascun RCA, individuato dal proprio codice numerico CER (catalogo europeo rifiuti), corrisponde una discarica di destinazione.

Categoria e/o attività generatrice di rifiuti	R.C.A. (Rifiuti contenenti Amianto)	Discarica di destinazione per i rifiuti	Codice CER
Materiali da costruzione	Materiali edili contenenti amianto legato in matrici cementizie o resinoidi	Non pericolosi	170605
Attrezzature e mezzi di protezione individuale	Dispositivi di protezione individuali e attrezzature utilizzate per la bonifica di amianto contaminati da amianto	*	150202
Freni	Materiali d'attrito	Pericolosi	160111
Materiali isolanti	Pannelli contenenti amianto	Pericolosi	170601
	Coppelle contenenti amianto		
	Carte e cartoni		
	Tessili in amianto		
	Materiali spruzzati		
	Stucchi, smalti, bitumi, colle		
	Guarnizioni		
	Altri materiali isolanti contenenti amianto		
Contenitori a pressione	Contenitori a pressione contenenti amianto	Pericolosi	150111
Apparecchiature fuori uso contenenti amianto	Apparecchiature fuori uso contenenti amianto	Pericolosi	160212
Rifiuti da	Materiali incoerenti contenenti amianto	Pericolosi	101309

fabbricazione di amianto cemento	da bonifiche anche di impianti produttivi dimessi: Polverini, Fanghi, Spazzatura, Stridi, Spezzoni		
Rifiuti da processi chimici da alogeni	Rifiuti da processi elettrolitici contenenti amianto	Pericolosi	060701
Rifiuti da processi chimici inorganici	Rifiuti dalla lavorazione dell'amianto	Pericolosi	061304
Materiali ottenuti da trattamenti **	Materiali ottenuti da trattamenti di RCA stabilizzati con indice di rilascio < 0,6	Non pericolosi	190306
	Materiali ottenuti da trattamenti di RCA stabilizzati con indice di rilascio >= 0,6	pericolosi	190304

Tabella 2

I materiali da costruzione contenenti amianto legato in matrice cementizia o resinoide (individuati dal codice 170605), secondo il decreto n. 248/04, possono essere smaltiti in discarica per rifiuti non pericolosi senza essere sottoposti a prove. Alla stessa destinazione sono indirizzati quei RCA che sono stati sottoposti a trattamenti di stabilizzazione e che come conseguenza presentano un i.r. (indice di rilascio) inferiore a 0,6 (CER 190306).

L'i.r., definito nelle sue modalità di determinazione solo con il decreto 248/04, è un indice di cui la legge prescrive la determinazione sono in casi particolari (come si è detto a seguito di un trattamento di stabilizzazione parziale) per individuare la destinazione dei rifiuti ottenuti. Esso viene ricavato applicando la seguente relazione:

$$i.r. = \frac{\% \text{Peso Amianto} * \text{Densità Assoluta}}{\text{Densità Apparente} * 100}$$

La prova, per il calcolo del i.r., viene eseguita su campioni privi di qualsiasi contenitore o involucro del peso complessivo non inferiore ad 1 kg.

Per il conferimento di rifiuti di amianto o contenenti amianto in discarica devono essere rispettati, oltre ai criteri e ai requisiti, previsti per le discariche di rifiuti pericolosi e non pericolosi, le modalità ed i criteri di deposito specifici per l'amianto, la dotazione di

adeguate attrezzature e misure di protezione del personale dalla contaminazione da fibre.

In particolare:

- i rifiuti non devono contenere altre sostanze pericolose al di fuori dell'amianto legato, comprese le fibre legate da un agente legante o imballate in plastica,
- la discarica accetta solo materiale edile contenente amianto e altri rifiuti assimilabili all'amianto. Tali rifiuti possono anche essere collocati in un'area separata di una discarica per rifiuti pericolosi se l'area in questione è sufficientemente isolata. Le celle devono essere coltivate ricorrendo a sistemi che prevedano la realizzazione di settori o trincee, spaziate in modo da consentire il passaggio di automezzi senza causare la frantumazione dei rifiuti contenenti amianto;
- per evitare la dispersione di fibre, la zona di deposito viene coperta con materiale appropriato, quotidianamente e prima di ogni operazione di compattaggio e, se i rifiuti non sono imballati, viene regolarmente irrigata. I materiali impiegati per la copertura giornaliera devono avere consistenza plastica, per poter adattarsi alla forma e ai volumi dei materiali da ricoprire;
- nella discarica o nell'area non vengono svolte attività che possano provocare una frantumazione dei materiali, come l'esecuzione di perforazioni;
- dopo la chiusura della discarica o dell'area si conserva una cartina che indichi dove sono stati collocati i rifiuti di amianto;
- allo scopo di evitare il contatto umano con i rifiuti, devono essere prese misure adeguate per limitare l'eventuale utilizzo del terreno dopo la chiusura della discarica.

Per le discariche di rifiuti pericolosi e non pericolosi che accettano rifiuti contenenti amianto, è spesso previsto uno specifico studio volto a valutare la distanza minima dai centri abitati, definito in relazione alla direttrice dei venti dominanti, da rispettare al fine di evitare qualsiasi possibile trasporto aereo delle fibre. Tale direttrice viene stabilita sulla base di dati statistici significativi dell'intero arco dell'anno e relativi ad un periodo non inferiore a 5 anni.

Campionamento e analisi dei rifiuti contenenti amianto- Per le discariche dove sono smaltiti rifiuti di amianto o contenenti amianto, il parametro utilizzato per il monitoraggio e controllo è la concentrazione di fibre nell'aria. La frequenza delle misure viene fissata all'interno del piano di sorveglianza e controllo.

Per la valutazione dei risultati si deve far riferimento ai criteri cautelativi di monitoraggio indicati nel decreto del Ministro della Sanità 6 settembre 1994. Per questo tipo di monitoraggio vengono adottate le tecniche analitiche di MOCF, microscopia ottica in contrasto di fase. Per quanto riguarda, invece, l'analisi del rifiuto, il contenuto di amianto in peso deve essere determinato analiticamente impiegando una delle metodiche analitiche quantitative previste dal decreto del Ministro della Sanità del 6 settembre 1994.

2.2 Problematiche inerenti le discariche

Come è noto, nelle discariche viene a crearsi il percolato che, adottando la definizione dell'EPA, potremmo definire come un liquido, originato a seguito dell'infiltrazione delle acque meteoriche, che nell'attraversare il corpo dei rifiuti, si carica di inquinanti ed eventuali liquidi sospesi. Questo liquido si accumula sul fondo delle celle e, in quanto pericoloso, deve essere trattato e depurato, secondo normativa, prima di essere inviato allo scarico. Di fatto la gestione di una discarica, durante il periodo di operatività e nei tempi successivi al suo abbandono, è fortemente gravata dal problema della percolazione delle acque meteoriche. Il percolato, che si raccoglie sul fondo delle celle, deve essere continuamente rimosso e trattato in idonei impianti di depurazione per un periodo di almeno 30 anni oltre la chiusura della discarica stessa.

Uno studio indica la possibile presenza di fibre di amianto proprio nel percolato delle discariche, lanciando un preoccupante allarme di rischio ambientale. Se infatti il percolato è oggetto di successive operazioni di depurazione, è anche vero che negli impianti di depurazione convenzionali questo trattamento viene condotto con metodologie che portano alla formazione di aerosol e generazione di vapori che possono causare la dispersione di fibre nell'ambiente.

Il decreto legislativo 36/03, che recepisce la direttiva europea 99/31/CE, prevede il conferimento in discarica degli MCA in celle mono-dedicate, ovvero aree confinate, destinate esclusivamente a questo scopo, rendendo più agevole la rintracciabilità di tali rifiuti e potenzialmente permettendo una migliore gestione dello stesso percolato. In realtà la direttiva non prevede lo smaltimento separato dei percolati provenienti dalle celle mono-dedicate, né l'utilizzo di dispositivi che possano trattenere le fibre di amianto in esso eventualmente presenti.

L'Università Ca' Foscari di Venezia, ISPESL (Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza sul Lavoro), Barricalla s.p.a. (società che gestisce la discarica per materiali pericolosi di Torino), IDERE stoccaggio s.r.l.(società specializzata nel trattamento dei rifiuti solidi urbani non pericolosi) hanno sviluppato un progetto articolato, volto alla:

- determinazione di una procedura per monitorare la presenza delle fibre di amianto presenti nei percolati;
- conduzione di una campagna di monitoraggio delle fibre di amianto presenti nei percolati;
- realizzazione di un prototipo del sistema di filtrazione dei percolati che permette il trattamento sul luogo del percolato, preliminarmente al trasferimento alle aziende specializzate nel suo smaltimento.

Nella discarica Barricalla S.p.A. di Torino, unica discarica per rifiuti pericolosi, ex C2, attiva in Italia con sistema di gestione ambientale certificato EMAS, si è provveduto a monitorare i percolati provenienti da differenti celle, per un arco di tempo di due anni. Il progetto che ha visto la collaborazione di, ha portato allo studio per la costruzione di un impianto pilota per la filtrazione delle fibre di amianto che possono essere presenti nel percolato. La tecnologia di base, ancora oggetto di sviluppo, prevede l'utilizzo di filtri a porosità decrescente, associati a riduzione del carico organico.

L'impianto prevede l'esistenza di una vasca di omogeneizzazione e di stoccaggio, punto di arrivo del percolato proveniente dalle celle della discarica e punto di partenza dello stesso schema di trattamento. Dopo una filtrazione alla dimensione di 220 micron, con lo scopo di isolare le componenti più grossolane presenti nel percolato, la carica passa nel digestore mentre i reagenti, acido solforico e perossido di idrogeno, vengono introdotti nella camera del reattore "batch" in cui ha luogo la reazione di riduzione del carico organico. Questa reazione prevede una mineralizzazione in ambiente acido/ossidante e sotto irraggiamento di microonde, generate da 4 magnetron. Riscaldando la soluzione a circa 120° C, la reazione dovrebbe raggiungere il compimento in circa 20 minuti. Il calore posseduto dal liquido già trattato nel reattore verrebbe in parte recuperato utilizzando uno scambiatore con il compito di preriscaldare una nuova carica da trattare. Il liquido, ormai raffreddato, viene infine pompato attraverso una serie di filtri di porosità decrescente da 25 e 1 micron in modo da poter trattenere le particelle e/o fibre di dimensioni inferiori.

IL DECRETO N. 248

In tempi piuttosto recenti, a conferma dell'attualità della problematica amianto, il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio ha emesso un decreto (Decreto 29 luglio 2004, n. 248) volto a disciplinare le attività di recupero dei prodotti e beni di amianto e contenenti amianto. In particolare nel decreto vengono affrontate due questioni:

- Si precisano le modalità di trasporto, deposito dei rifiuti di amianto e si definiscono i disciplinari tecnici sul trattamento, imballaggio e ricopertura dei rifiuti stessi nelle discariche;
- Si individuano e si definiscono i processi di trattamento dei rifiuti contenenti amianto.

Con tale norma lo Stato Italiano fa fronte ad una lacuna legislativa e riconosce la validità di trattamenti di modifica del materiale amianto, trattamenti oggetto studio e di ricerca da ormai un decennio in tutta Europa come alternativa al conferimento in discarica. Tale Decreto si pone come naturale prosecuzione di quanto auspicato nella Legge Ronchi del 1997, Art.4 (Recupero dei rifiuti): *Ai fini di una corretta gestione dei rifiuti le autorità competenti favoriscono la riduzione dello smaltimento finale dei rifiuti attraverso: a)il reimpiego ed il riciclaggio; b)le altre forme di recupero per ottenere materia prima dai rifiuti ...*

Gli studi sulla inertizzazione dell'amianto previo trattamento termico dei manufatti indicano una strada che può essere percorsa con buone prospettive. Resta il problema del preliminare trattamento meccanico che rischia di aumentare la quantità di fibre disperse nell'ambiente ed il problema dei materiali utilizzabili per confinare e/o riciclare i prodotti inertizzati. L'argilla rappresenta un materiale valido per far fronte a queste necessità, sia in relazione alla possibilità di eseguire i trattamenti meccanici dei MCA in una miscela di argilla fluida, sia in relazione al possibile riutilizzo dei materiali ceramici ottenuti in seguito alla cottura della miscela di argilla e manufatti contenenti amianto.

3.1 Trattamento dei rifiuti contenenti amianto

Il trattamento che può essere condotto sui rifiuti è un processo di tipo biologico, chimico, termico o fisico con lo scopo di ottenere un prodotto avente una minore pericolosità e/o un minor volume.

Il Decreto n. 248/04 pone una distinzione su i trattamenti che possono essere applicati al MCA in base all'effetto che essi sortiscono sul materiale trattato:

- 1 Trattamenti che hanno lo scopo di ridurre il rilascio di fibre
- 2 Trattamenti che comportano una totale trasformazione delle fibre di amianto.

Adottando i trattamenti del punto 1 si ottiene una riduzione della pericolosità del materiale non intervenendo affatto sulla modifica della struttura cristallina o agendo parzialmente su di essa. Sono riconducibili a questa categoria: i trattamenti di stabilizzazione o solidificazione in una matrice, organica o inorganica, stabile e non reattiva (a freddo); l'incapsulamento; la modifica parziale della struttura cristallo chimica.

Queste modifiche parziali del materiale comportano che siano ancora presenti le sue componenti pericolose e che possano essere disperse nell'ambiente nel breve, medio o lungo periodo. La destinazione per questo tipo di rifiuti rimane la discarica.

I trattamenti del punto 2 sono, invece, quelli che hanno lo scopo, modificando completamente la struttura cristallo chimica dell'amianto, di annullarne la pericolosità. I prodotti ottenuti possono essere considerati come una nuova materia prima e pertanto sono destinati al riutilizzo a condizione che rispettino precise prescrizioni. Molte sono le tipologie di processo che si possono adottare: Modificazione chimica, Modificazione meccanochimica, Litificazione, Vetrificazione, Vetroceramizzazione, Mitizzazione pirolitica, Produzione di clinker, Ceramizzazione.

3.1-1 Trattamenti che hanno lo scopo di ridurre il rilascio di fibre

I trattamenti di stabilizzazione o solidificazione in una matrice sono essenzialmente riconducibili a due tipologie:

- condizionamento in matrice cementizia (consente una riduzione del volume iniziale);
- condizionamento in matrice di resina (produce un aumento del volume iniziale).

Il processo comporta la realizzazione di manufatti caratterizzati da un maggior peso e, talvolta, un maggior volume rispetto al rifiuto di partenza. Per contro, i costi di gestione e di produzione risultano alquanto contenuti. Il processo è indicato soprattutto per rifiuti di amianto friabile nei quali la componente non asbestosa, specie se di natura inorganica (solfati, carbonati, ecc.), è presente in quantità preponderante.

L'adozione di questi trattamenti implica una preliminare operazione di caratterizzazione da condurre sul materiale contenente amianto al fine di separare il minerale da eventuali altri componenti di diversa natura (materiali ferrosi, materiali plastici).

Se il condizionamento avviene in matrice cementizia, una volta macinato, l'amianto viene miscelato con pasta o malta di cemento ricorrendo, eventualmente, all'aggiunta di additivi ad azione fluidificante al fine di ottimizzare il rapporto acqua/cemento, ottenere una maggiore velocità di idratazione, una minore capillarità residua ed una minore tendenza alla fessurazione od ancora favorire il contatto tra acqua e fibre, permettendo una più omogenea distribuzione di esse nell'impasto con conseguente riduzione dei vuoti ed aumento della densità (0,3-1,4 g/cm³).

Esistono numerosi brevetti per questa tipologia di trattamento, che si differenziano per le differenti modalità operative, la % in peso di MCA trattato (che può raggiungere il 50%), gli additivi utilizzati; così ad esempio ci sono processi in cui, a seguito della miscelazione acqua/cemento, il prodotto, omogeneizzato, viene colato in forme metalliche della capacità di 1 m³ ed eventualmente vibrato; in altri si opera una compattazione dei rifiuti a pressioni non superiori a 50 MPa, dopo averli preventivamente triturati e miscelati con legante cementizio entro fusti petroliferi standard da 55 galloni ottenendo prodotti costituiti da pastiglie (o pizze), rivestite da lamiera di ferro con un I.R. < 0,6. Conseguentemente anche i costi di questi trattamenti coprono un range che va da 0,20 Euro/kg a 1,3 Euro/kg a cui si devono sommare i costi della messa a dimora in discarica per i prodotti ottenuti.

Il Centro ENEA, Ente per le Nuove Tecnologie l'Energia e l'Ambiente, della Trisaia di Rotondella, in provincia di Matera, che opera nell'ambito del trattamento di rifiuti e reflui, ha sperimentato un impianto mobile di stabilizzazione/solidificazione in matrice cementizia di rifiuti contenenti amianto, denominato ICAM. La lavorazione condotta in catena in 4 container attrezzati, sarebbe in grado di inglobare 10 metri cubi giornalieri di rifiuti contenenti amianto (attualmente stoccabile in discariche di tipo 2A). Noto la superficie interessata al processo (800mq) e il consumo di 160 kilowatt/1.000kg di RCA. L'inconveniente di fondo è la triturazione dei rifiuti col conseguente rischio di dispersione delle fibre, anche se l'ENEA assicura la sicurezza ambientale e degli operatori attraverso un confinamento fisico e dinamico dell'impianto durante l'esercizio e un sistema di filtraggio per il trattamento dell'aria in uscita.

L'incapsulamento, realizzato attraverso un'immobilizzazione delle fibre di amianto in una matrice polimerica, viene adottato come soluzione per trattare i manufatti in cemento amianto. Questi, dopo essere stati puliti con l'invio di acqua ad alta pressione, vengono prima ricoperti di una resina epossidica bicomponente che penetra e consolida le lastre, preparando così il materiale all'ulteriore applicazione della resina incapsulante monocomponente, applicata a spruzzo o a pennello, con il risultato di ottenere un rivestimento continuo ed elastico.

3.1-2 Trattamenti che comportano una totale trasformazione delle fibre di amianto

Sono trattamenti di natura chimico - fisica, particolarmente adatti a quei RCA (sia in forma friabile che compatta), con elevata presenza di componente asbestosa e di materiali plastici di rifiuto, che risultano facilmente distrutti dai trattamenti termici. L'ENEA e il CSM, Centro Sviluppo Materiali, hanno svolto una serie di attività, volte all'acquisizione di informazioni, censimenti che hanno portato alla realizzazione di impianti prototipi per il trattamento dei MCA.

In particolare, data l'enorme diffusione e dispersione degli RCA sul territorio nazionale, l'ENEA ritiene che il tipo di intervento più adeguato consista nella realizzazione di impianti mobili per il trattamento integrato dei rifiuti contenenti amianto con le migliori tecnologie disponibili, con lo scopo di consentire un intervento mirato, soprattutto dove l'installazione di impianti fissi non è giustificata dalla presenza di un grande utenza.

Il CSM, in collaborazione con l'ENEA, sta finalizzando la sua azione dimostrativa verso un impianto basato sulla distruzione termica dell'amianto in un forno che utilizza la tecnologia con torcia al plasma (TRITAM).

Il CSM ha sperimentato l'utilizzo di processi termici per il trattamento dell'RCA già dagli inizi degli anni '90, mettendo a punto, nel 1999, su scala pilota, sistemi innovativi di trasformazione termica di RCA in materiali inerti che offrono possibilità di re-impiego. Il progetto finale è volto alla costruzione un impianto mobile dimostrativo con torcia la plasma. In particolare sono stati studiati processi a temperature relativamente basse, per verificare la possibilità di riutilizzo in edilizia in materiali derivanti dal trattamento di RCA. In questi casi ci si è basati sulla proprietà dei diversi tipi di amianto (crocidolite, crisotilo) di perdere i gruppi ossidrilici e di subire trasformazioni di fase già intorno ai 900-1000° C, senza la necessità di arrivare alla temperatura di fusione con trasformazione delle

fibre di amianto. Il materiale ottenuto può già trovare un re-impiego, se macinato e impastato con acqua e calce e trasformato in legante cementizio. Il processo, brevettato dal CSM, consiste nella miscelazione del rifiuto contenente amianto, dopo frantumazione con additivi di recupero, del tipo scorie di altoforno e refrattari silico-alluminosi, per portare l'indice di basicità a circa 1. La miscela, fusa in forno a induzione con crogiolo di grafite, o in forno al plasma, viene colata su un piatto fisso o rotante (20-25 giri al secondo), di forma concava, realizzata in materiale refrattario. L'esperienza condotta a temperature comprese tra 600 e 1000 °C, mostra la possibilità di ottenere un materiale inerte senza fibre (piatto fisso). Su questa base è stato elaborato un progetto, approvato dal MURST, Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica, per la realizzazione di un impianto mobile dimostrativo di trattamento di RCA, operante sul principio della torcia a plasma (1300-1400 °C), avente una potenzialità pari a circa 5 tonn/giorno, capace di trasformare completamente la struttura cristallografica dell'amianto, con ottenimento di materiali inerti per usi civili o industriali.

L'impianto prevede le seguenti unità:

- generatore diesel di circa 1 MW;
- unità di pre-trattamento, comprensiva di triturazione, essiccamento e miscelazione additivi;
- reattore con torcia al plasma, completo di sistema di alimentazione di potenza;
- unità di granulazione del prodotto fuso e/o filatura;
- cabina di controllo ed analisi particolato e emissioni.

Analisi chimiche e diffrazione a raggi X consentono di accertare l'assenza di fibre di amianto e verificare la versatilità del processo nei confronti di differenti tipologie di RCA, così come test di lisciviazione permettono il controllo del rilascio degli inquinanti.

TRATTAMENTI DI TRASFORMAZIONE DELLA STRUTTURA DELL'AMIANTO			
Trattamento	Principio	Volume del prodotto	Destinazione finale
Attacco chimico	Modificazione della struttura del rifiuto e precipitazione di sali non tossici	Aumento a seguito della formazione di fanghi di trattamento	Discarica Industria edile
Litificazione	Fusione a temp. elevate (1300-1450 °C)	Inferiore al volume iniziale	Discarica Industria edile
Litificazione pirolitica	Produzione di argilla espansa	Superiore al volume iniziale	Discarica Industria edile
Vetrificazione	Fusione con additivi a temperature elevate (1000-1300 °C)	Inferiore al volume iniziale	Discarica Litificazione
Produzione di clinker	Fusione con calcare ed argilla	Inferiore al volume iniziale	Uso come cemento idraulico
Ceramizzazione	Cottura a 800-1000°C	Inferiore al volume iniziale	Isolante termico ed elettrico
Vetroceramizzazione	Fusione a 1300°C Cristallizzazione a 900 °C	Inferiore al volume iniziale	Isolante termico, Pavimentazioni
Trasformazioni mecanochimiche	Distruzione della struttura cristallina mediante stress meccanico	Inferiore al volume iniziale	Inerte Filler Catalizzatori

Tabella 1- Trattamenti di inertizzazione dell'amianto

3.1-2.a Modificazione Chimica

Le procedure di inertizzazione dei materiali contenenti amianto che prevedono il ricorso all'attacco chimico impiegano reattivi chimici al fine di ottenere la dissoluzione dei materiali, ricorrendo, talvolta, anche a variazioni dei valori di pressione e temperatura da osservare nel processo, al fine di attivare le reazioni di trasformazione richieste.

I reagenti utilizzati possono essere soluzioni di soda (NaOH), acido fluoridrico (HF), acido solforico (H₂SO₄), od ancora scarti acidi dell'industria chimica. La scelta è dettata dalla diversa suscettibilità mostrata dai differenti tipi di amianto nei confronti delle soluzioni: l'acido fluoridrico, ad esempio, viene proposto per quei MCA che mostrano resistenza nei confronti dell'azione dell'acido cloridrico, solforico o nitrico.

Spesso il trattamento prevede che l'MCA sia sottoposto ad una serie di attacchi successivi in soluzioni concentrate ottenendo come output due prodotti: una fase liquida, che dopo essere stata sottoposta ad un processo di rigenerazione, può prendere parte come agente in un nuovo attacco chimico del materiale, ed una fase solida. Questo residuo è quello che costituisce la “nuova” materia prima ottenuta: a seconda della natura del minerale di amianto, si aprono nuove possibilità per il loro riutilizzo che spaziano dall'azione di flocculante nella precipitazione dei metalli pesanti, a quella di additivo utilizzato nell'industria della ceramica, dei refrattari e nella produzione dei cementi, a quello di inerte nel confezionamento dei calcestruzzi, come sostituto di una quota parte del materiale sabbioso.

I parametri di tali processi, che governano il buon esito del trattamento, devono essere accuratamente controllati come, d'altronde, è richiesta attenzione nella manipolazione di acidi e basi forti impiegati. Un impianto di tipo chimico richiede anche un opportuno trattamento dei gas prodotti che devono passare attraverso una sezione di filtraggio e di lavaggio.

3.1-2.b Modificazione meccanochimica

I trattamenti meccanochimici affidano all'energia meccanica trasmessa al MCA da macchine trituratrici il compito di distruggere i reticoli cristallini e i legami molecolari presenti nell'amianto, causa della sua stessa pericolosità.

Il processo di ultramacinazione, a cui viene sottoposto l'amianto, avviene in mulini che operano con le più diverse metodologie, a vibrazione a lame, a sfere od ad anelli, le stesse tecniche viste con interesse da parte sia dall'industria del riciclo di plastiche eterogenee che nella produzione di leghe metalliche. Come conseguenza degli intensi valori delle sollecitazioni di compressione e taglio a cui il materiale viene sottoposto e delle simultanee deformazioni elastiche e plastiche, si osservano, dal punto di vista microscopico, modificazioni irreversibili come uno scorrimento dei piani reticolari e una distorsione della cella elementare del reticolo cristallino. Perdendo totalmente il suo abito originale, l'amianto si presenta del tutto amorfo, simile ad un vetro, presentando inoltre una notevole superficie specifica e reattività superficiale. Importante però è osservare il carattere delicato di questa procedura di inertizzazione: gli effetti raggiunti dalla trasformazione meccanochimica sono strettamente legati alla composizione del materiale di partenza. Se il materiale di input è un minerale asbestoso puro l'inertizzazione procede con successo, in caso contrario, di fronte alla presenza di minerali compositi, si incorre in maggiori difficoltà nel trattamento.

3.1-2.c Litificazione

Il trattamento di litificazione prende a prestito il termine dalla geologia, disciplina in cui indica propriamente il processo per il quale le rocce sedimentarie diventano compatte e indurite. Come nella geologia ciò avviene sotto l'azione di elevate temperature, anche questo processo prevede il raggiungimento di una fase di fusione, compresa tra i 1300 ed i 1550 °C, ed una di parziale cristallizzazione del materiale, a seguito di un lento raffreddamento, che spesso avviene all'aria.

La fase cristallina non è presente in quantità rilevante (0-25%) costituita da ossidi di ferro, titanio, alluminio, e da silicati di magnesio, calcio, ferro ed alluminio mentre la componente vetrosa, altro costituente del prodotto, è invece simile ad un'ossidiana, composta quindi da un vetro silicatico ricco in ferro, calcio e alcali, spesso derivanti dai fondenti usati nella fusione. Le proprietà fisiche e meccaniche che il materiale ottenuto dal

trattamento presenta, come l'elevato peso specifico ($3,15 - 3,20 \text{ g/cm}^3$), una durezza di 5-6 della scala Mohs, un'ottima resistenza meccanica sia alla compressione ($\sigma \cong 700 \text{ MPa}$) che alla trazione, ne fanno un valido prodotto da utilizzarsi nell'industria delle costruzioni.

3.1-2.d Vetrificazione

Il vetro si pone come una possibile soluzione per affrontare le più diverse problematiche di natura ambientale come la rimozione delle pitture al piombo, la stabilizzazione dei rifiuti di natura nucleare ma anche l'abbattimento dell'amianto. Il processo della vetrificazione è stato studiato per convertire un'ampia varietà di rifiuti pericolosi e/o radioattivi in prodotti solidi stabilizzati, rendendoli così innocui ed atti ad essere messi a dimora in condizioni di sicurezza. Inoltre si possono ottenere prodotti riciclabili o materie prime riutilizzabili. L'EPA ha definito la vetrificazione come la "Best Demonstrated Available Technology (BDAT)" ovvero la tecnologia disponibile sperimentata migliore per il rifiuto radioattivo di alto livello e prodotto un manuale delle tecnologie di vetrificazione per il trattamento di rifiuti pericolosi e radioattivi.

La stabilizzazione nella matrice vetrosa viene raggiunta fondendo il rifiuto con gli ossidi che formano il vetro (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5) ad elevate temperature, così legando dal punto di vista atomico le specie pericolose o radioattive nella matrice vetrosa assicurando uno smaltimento in sicurezza per migliaia di anni, ottenendo nel contempo una notevole riduzione del volume del rifiuto (superiore al 97%), minimizzando i costi inerenti la discarica. D'altronde l'utilizzo di differenti tecnologie di stabilizzazione, come il confinamento in matrice cementizia, non producono una forma di rifiuto sufficientemente durabile.

Gli MCA vengono modificati nella loro struttura agendo sulla variabile temperatura, elevando il valore di questa fino a $2000-3000^\circ\text{C}$ o utilizzando fondenti e temperature inferiori ma comunque raggiungendo lo stato di fusione. Segue poi un rapido raffreddamento con produzione di materiale inerte.

3.1-2.e Vetroceramizzazione

Il processo di vetroceramizzazione, finalizzato all'ottenimento di materiali dalle caratteristiche fisico - meccaniche pregiate, come l'elevata temperatura di fusione, un basso valore del coefficiente di dilatazione termica e l'elevata resistenza all'abrasione, nasce come possibile metodologia per il riutilizzo di scarti industriali. Questa tecnologia prevede le seguenti fasi di lavorazione:

- fusione ad elevata temperatura
- omogeneizzazione del fuso
- nucleazione
- cristallizzazione

La fusione avviene a temperature comprese tra i 1350 ed i 1550° C, eventualmente accompagnata dall'introduzione di additivi; questi possono essere costituiti da scorie d'altoforno o fanghi industriali, come i fanghi rossi, ovvero i reflui provenienti dall'estrazione elettrolitica dello zinco, che conferiscono al materiale un alto tenore in metalli. In questo ultimo caso i MCA, miscelati con acqua, vengono macinati sino ad ottenere un d_{80} pari a 10-60 micron e poi uniti ai fanghi rossi (osservando un tenore di amianto pari a circa il 75-90% a cui corrisponde un'aggiunta di fanghi pari al 10-25%), effettuando, eventualmente, un'ulteriore aggiunta di carbonati (CaCO_3 ed Na_2CO_3). Segue una fase di omogeneizzazione e di nucleazione portando la temperatura, mediante forno, al valore di 750-950° C. Se la fusione avviene in presenza di fasi enucleanti, costituite da biossido di titanio, la fase di nucleazione avviene a circa 600 °C mentre la successiva fase di cristallizzazione a temperature comprese tra i 750 e 850°C.

La cristallizzazione, se condotta a temperatura controllata, permette di ottenere prodotti con elevata resistenza meccanica e particolarmente adatti come piani di rivestimento e di protezione dell'industria edile, chimica e meccanica.

Parametri del processo sono le condizioni del materiale di partenza, ad esempio di degassaggio, la fluidità mostrata dal fuso e da essi dipendono sia le proprietà del materiale ottenibile e conseguentemente i tempi richiesti dal processo.

3.1-2.f Mitizzazione pirolitica

La mitizzazione pirolitica è la decomposizione e conversione di un qualunque prodotto mediante trattamento termico ed in presenza di un materiale inorganico, in genere argilla. Ad opera della combustione, la componente organica, presente nel materiale trattato, viene decomposta mentre la componente inorganica del prodotto si lega all'argilla, introdotta a tal scopo, per dar luogo ad un prodotto solido. L'argilla quindi diventa un mezzo per inglobare, dal punto di vista atomico, dopo il verificarsi di opportune reazioni chimiche, materiali altrimenti destinati allo smaltimento in discarica, pericolosi o non.

Con questo scopo possono essere aggiunti MCA all'impasto per la produzione di argilla espansa sfruttando la capacità che le argille possiedono, ad elevate temperature, di fissare ioni metallici estranei alla struttura originale, sia per la sostituzione di ioni reticolari che per la formazione di nuovi composti cristallini o di soluzioni solide.

L'argilla espansa viene prodotta da una miscela di argilla purificata con un contenuto medio di acqua pari al 22-24% e di olio combustibile pari allo 0.8%. La preparazione prevede una fase di essiccazione, una di combustione, una di fusione parziale e una di raffreddamento. La miscela viene dapprima essiccata in una opportuna sezione del forno di cottura mediante bruciatore diretto sull'impasto, portando la miscela alla temperatura di circa 300 °C. In questa fase si determina inizialmente la perdita di acqua di assorbimento, successivamente dell'acqua di interstrato ed infine dell'acqua di costituzione e inizia la demolizione della struttura cristallina dell'argilla.

Il materiale essiccato entra quindi a circa 1000 °C dove avviene la combustione delle sostanze organiche: per rapido effetto dell'aumento di temperatura e per la fuoriuscita del gas generato dalla combustione dell'olio combustibile si ha un'espansione del granulo di argilla. Man mano che la miscela avanza nel forno la temperatura raggiunge i 1300-1400 °C; i granuli che la compongono sono sottoposti ad un repentino aumento della temperatura ed alla conversione dello strato esterno in una fase plastica con successiva formazione di uno strato esterno vetroso. Un gradiente di temperatura fra questo strato e la parte più interna dei granuli, esistente a causa della bassa conducibilità termica del materiale, implica che non avvenga la fusione dell'intera massa: questo permette al materiale di mantenere al suo interno una struttura porosa.

Se in miscela all'argilla viene aggiunto del materiale contenente asbesto (nelle sue forme crisotilo, amosite, crocidolite etc.) avvengono, data la grande reattività dell'argilla

alle temperature, comprese tra 650 °C e 950 °C, delle reazioni (cessione di elementi tra le varie fasi allo stato solido e a cristallizzazioni di fasi a sé stanti come la cordierite, mullite etc.) che portano alla formazione di fasi silicatiche.

Al fine di ottenere argille espanse di caratteristiche tecniche simili a quelle commerciali la percentuale massima di MCA da aggiungere alla miscela si aggira intorno al 20% della carica totale introdotta nel forno dell'impianto.

3.1-2.g Produzione di clinker

La tecnica di inertizzazione e riconversione dell'amianto che prevede la produzione di clinker guarda con interesse in particolar modo al riciclaggio di rifiuti di cemento-amianto. Questi materiali, infatti, presentano, in associazione con il cemento, amianto nella percentuale del 10- 15 %, spesso del tipo crisotilo. La natura calcarea e silicea di questo tipo di MCA lo rende appetibile per la produzione di clinker ma, d'altro canto, il trattamento termico del crisotilo presenta aspetti molto delicati. Ad elevate temperature si ha la trasformazione del crisotilo in forsterite (Mg_2SiO_4), ma in corrispondenza di valori ancora maggiori si assiste alla formazione di ossidi di magnesio (MgO) e silicati di calcio (Ca_2SiO_4). L'ossido di magnesio, ottenuto a seguito della reazione del crisotilo, può essere causa del verificarsi di comportamenti anomali nella fase di idratazione del cemento prodotto e per questo motivo richiede un'adeguata attenzione.

Alcuni studi hanno dimostrato che possibile trasformare termicamente 50 t/giorno di cemento-amianto in una unità da 3000 t/giorno senza modificare sostanzialmente la composizione del cemento prodotto, operando con l'eventuale aggiunta di CaF_2 (fluoruro di calcio) che permettere il verificarsi delle reazioni a più bassa temperatura.

Tuttavia l'adozione di questa tecnologia non è immediata in quanto si ha a che fare con rifiuti tossico-nocivi che richiedono opportune modifiche, spesso costose, dell'impianto del cementificio in modo da garantire lo svolgimento di tutte le operazioni in sicurezza. Si rende necessaria, ad esempio, la granulazione in ambiente controllato, mentre il trasferimento della metodologia in impianti che seguono la via umida di produzione del cemento, ormai non più attuale, sembra più agevole.

L'alternativa tecnologica è quella di operare in due fasi: Preventivamente trattare termicamente il cemento-amianto e successivamente procedere alla produzione di clinker

di cemento. Questa procedura consente di degradare la componente asbestoide, operando ad una temperatura di 900 °C, quindi evitando la formazione di periclasio, ottenendo silicati di calcio che possiedono delle proprietà idrauliche. L'utilizzo del 5-10% di prodotti provenienti dalla degradazione termica del cemento-amianto nella preparazione dei clinker permette di produrre dei cementi di caratteristiche tecniche simili a quelle commerciali eliminando nel contempo grandi quantità di cemento-amianto.

In Italia l'Italcementi (brevetto MI92A001803) messo a punto un processo per il riciclo di manufatti di Eternit con lo scopo di produrre cemento idraulico. Il materiale, senza preventiva macinazione, viene trattato termicamente alla temperatura di 600-800 °C e, presentando ancora una certa reattività idraulica, può essere reimmesso nel ciclo di produzione del cemento o come materia prima in aggiunta alla farina per la preparazione del clinker o come correttivo del clinker stesso per la preparazione del cemento.

3.1-2.h Ceramizzazione

E' uno dei trattamenti riconosciuti dal decreto n. 248/04 per la modifica della struttura cristallina, che come effetto ha quello di produrre prodotti di tipo ceramico.

Un processo di ceramizzazione, denominato CORDIAM (brevetto RM96A000782), prevede il mescolamento del materiale di amianto, preventivamente granulato e macinato, con il minerale di argilla contenente caolino alla temperatura di 650°C. In tali miscele i componenti, RCA e argilla, sono presenti in rapporto 1:1 o 1:2, a seconda della natura del materiale di origine. Mediante scambio ionico il caolino interagisce con l'amianto e, grazie all'alta temperatura, i minerali mescolati, inizialmente allo stato cristallino, perdono la loro struttura originaria per presentarsi in uno stato amorfo. Un'ulteriore aumento di temperatura consente la formazione di nuove strutture cristalline stabili e quindi nuovi minerali, quali la cordierite ($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{18}$), l'olivina (Mg_2SiO_4), la silice (SiO_2), accompagnati dal rilascio di acqua. Le reazioni si differenziano a seconda del tipo di minerale asbestoso di origine:

- l'amosite tende a perdere ossidi di ferro;
- la crocidolite tende a dissociarsi in silico-alluminati di sodio.

Le reazioni che intervengono in seguito alla miscela di crisotilo e caolino sono:

- per il crisotilo:
 - una reazione endotermica di deidrossilazione tra 550 e 650 °C;
 - fasi di transizione in cui si formano fasi silico-magnesiache parzialmente amorfe;
 - cristallizzazione di olivina ed enstatite tra 900°C e 1000 °C.
- per la caolinite:
 - una reazione di deidrossilazione endotermica tra 550°C e 700°C in seguito alla quale la caolinite risulta decomposta e si riscontrano fasi quali α -allumina e silice amorfa ed una fase definita metacaolinite;
 - reazioni in cui la silice amorfa e la α -allumina tendono a ricombinarsi oltre i 1300°C, dando luogo alla formazione di mullite.

La reazione tra crisotilo e caolino avviene durante la decomposizione delle due fasi, tra 550 °C e 950 °C; in questo intervallo termico hanno luogo le reazioni tra la componente silico-magnesiaca (probabilmente in stato amorfo) e la componente silico-alluminosa della metacaolinite e della fase amorfa associata. La presenza di sostanze inquinanti, quali ossidi di ferro, carbonati, solfati di calcio, od anche grandi quantità di solfato di calcio (gesso) possono comportare modifiche nei valori della temperature richieste dal processo così come nella composizione del prodotto finale.

I minerali così ottenuti portano alla produzione di materiali ceramici a basso coefficiente di espansione termica, aventi caratteristiche simili a quelle di un laterizio e pertanto riutilizzabile come nuova materia prima nell'edilizia o come inerte. Si possono ottenere in particolare:

- polveri ceramiche inerti contenenti olivina, enstatite, mullite (tra i 750 °C e 950 °C);
- sinterizzati leggeri ($d=1,05 \text{ g/cm}^3$) contenenti enstatite, mullite, cordierite (tra 950 °C e 1100 °C);
- sinterizzati pesanti ($d=1,8 - 2,6 \text{ g/cm}^3$) contenenti cordierite ed enstatite/mullite (tra 1100 °C e 1300 °C).

Nella tabella 1 vengono indicati i prodotti ottenibili a seguito di un processo di ceramizzazione, suddivisi a seconda del tipo di minerale di amianto di origine. Per semplicità si può operare la seguente schematizzazione:

- da rifiuti di amianto che contengono quasi esclusivamente fibre (tessuti, corde, lane di amianto, cartoni), costituiti quasi esclusivamente di cordierite, si ottengono materiali ceramici ad elevata refrattarietà che trovano applicazione nella fabbricazione di supporti a

basso coefficiente di dilatazione termica, (ad esempio nella la fabbricazione delle marmitte catalitiche e di filtri catalitici per uso industriale);

- da rifiuti di amianto di vario genere, quali materiali composti con cemento-amianto, pannelli, coibentazioni spruzzate in amosite, si ottengono materiali ceramici che possono essere re-impiegati come inerti o come materiali ceramici per refrattari e per laterizi;

- da rifiuti in matrice cementizia, quali eternit, dei tubi cassoni in cemento amianto, si possono ottenere, a seguito del trattamento, materiali ceramici per laterizi, aventi ottime caratteristiche di isolamento termico, elevata porosità ed elevata temperatura di rammollimento ($>1400^{\circ}\text{C}$), adatti alla fabbricazione di pannelli isolanti.

<u>Tipologia di rifiuto</u>	<u>% amianto</u>	<u>Rapporto argilla/rifiuto</u>	<u>Prodotti ottenuti</u>	<u>Utilizzo</u>
Cemento-amianto (lastre, tegole, tubi)	12-60	1:1 - 1:3	Silicati di calcio ed alluminio Wollastonite Akermanite	industria edile ceramici industriali
Amosite (coibentazione a spruzzo)	80-100	1:1 - 1:2	Cordierite Silicati di Fe-Mg	industria refrattari ceramici industriali inerti
Crisotilo (tessuti, corde, cascami di lavorazione)	65-100	1:1	Cordierite	filtri catalitici refrattari per industria chimica
Crocidolite (coibentazioni ferroviarie)	70-100	1:1	Fe-Cordierite	catalitici per industria chimica ceramici industriali

Tabella 2- Prodotti del trattamento di ceramizzazione

3.1-2.i Criteri di omologazione per i materiali inerti ottenuti a seguito di trattamenti

Il decreto 248 rimanda al DM 12/2/97 per quanto concerne le norme che regolano il riutilizzo dei materiali ottenuti dai trattamenti chimico-fisici ed i conseguenti requisiti richiesti per i materiali sostitutivi dell'amianto. Le prescrizioni a cui i materiali devono attenersi sono:

1. essere esenti da amianto
2. non devono contenere in concentrazione totale superiore allo 0,1% le sostanze elencate nell'allegato 1 al DM 16/2/93; e successive modificazioni che siano classificate come "cancerogene di categoria 1 o 2 e siano etichettate almeno come tossica T con la frase di rischio R45 "Può provocare il cancro" o con la frase di rischio R49 "Può provocare il cancro in seguito ad inalazione", ovvero classificate dalla Commissione Consultiva Tossicologica Nazionale (CCTN) nella categoria 1 o nella categoria 2, ovvero classificate dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul cancro (IARC) nel gruppo 1 nel gruppo 2a;
3. i materiali con abito fibroso (lunghezza/diametro > 3) devono possedere le seguenti caratteristiche:
 - diametro geometrico medio > 3 micron e contenute di fibre con diametro geometrico medio minore di 3 micron in percentuale sul totale delle fibre inferiore al 20%;
 - non devono contenere fibre che, indipendentemente dal loro diametro, abbiano la tendenza a fratturarsi lungo linee parallele all'asse longitudinale. Qualora contengano fibre che manifestino la tendenza a fratturarsi lungo l'asse longitudinale, devono essere considerati innocui da parte della Commissione Consultiva Tossicologica Nazionale (CCTN) ovvero, essere classificati dalla stessa Commissione in categorie diverse dalla 1 e dalla 2 o classificati dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca su Cancro (IRC) in categorie diverse dalla 1 e dalla 2a;
4. i materiali ottenuti dai trattamenti chimico-fisici dell'amianto non devono dar luogo a rifiuti classificabili come pericolosi a norma del D.Lgs 22/97 e successive modifiche.

Il riutilizzo dei materiali sottoposti a trattamenti di inertizzazione può avvenire solo a seguito del rilascio dei certificati di assenza di amianto da parte del CNR, ISPESL e ISS, e della definizione delle caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche del prodotto. Attualmente non sono definite in Italia prove specifiche e valori di riferimento per la

qualificazione di un materiale ottenuto da un processo di trattamento, requisiti legati alla destinazione d'uso del prodotto.

ALCUNI TRATTAMENTI DI INERTIZZAZIONE

In un convegno promosso dal CNR (novembre 2002), nell'ambito della valutazione dello stato di fatto in merito alla problematica della bonifica dell'amianto, si afferma che, ad oltre 10 anni dall'emanazione della legge 257/92, che ne ha vietato l'utilizzo, in Italia sono presenti 2,5 miliardi di metri quadri di coperture di eternit pari a 32 milioni di tonnellate di cemento amianto e molte tonnellate di amianto friabile, per un totale di amianto puro di circa 8 milioni di mc, di cui l'80% è costituito da crisotilo e il 20% dagli altri minerali. Ciò è dovuto all'uso massiccio e variegato che è stato fatto di questo materiale, costituente di oltre 3000 prodotti (tetti, condutture, mastici, freni..), interessando tutto il territorio nazionale con punte registrabili in Piemonte, dove si è localizzata la maggior parte della produzione europea, in Val D'Aosta e nei grandi poli industriali.

A partire dagli anni novanta si registrano in tutta Europa così come negli USA il fiorire di studi volti alla definizione e alla realizzazione poi di tecnologie di trattamento dei rifiuti contenenti amianto. Facendo una radicale semplificazione possiamo dire che sostanzialmente due sono le variabili su cui si opera per ottenere le volute modificazioni cristallo chimiche: la temperatura, raggiungendo anche il valore di fusione del materiale, e la composizione chimica, opportunamente fatta variare attraverso l'utilizzo di adeguate sostanze che prendono parte alle successive reazioni. Questa considerazione di base non deve trarre in inganno e non deve far pensare che i possibili trattamenti siano semplici e schematici, altrimenti non si spiegherebbe l'esistenza di tanti diversi brevetti depositati a tutt'oggi. Un'analisi critica del processo di trattamento del materiale contenente amianto richiede la conoscenza di molteplici fattori che vanno dalla natura del materiale di amianto, ovvero la forma mineralogica con cui si presenta, di cui già si è detto, la presenza di composti pericolosi, come i PCB, o più in generale la stessa forma fisica che l'amianto presenta; il tipo di tecnologia utilizzata; i tipi di prodotti ottenibili; i tempi; i costi. Inoltre nella valutazione di un processo va analizzato come esso si rapporta all'ambiente, senza dimenticare che questi trattamenti sui MCA nascono come alternativa al conferimento in discarica e quindi come una soluzione definitiva per lo smaltimento dell'amianto e di tutela anche nei confronti di possibili rischi futuri.

La qualificazione dei processi e dei prodotti di trattamento deve tener conto dei seguenti aspetti:

- Qualificazione processo
 - Limitazione alla produzione di rifiuti di processo
 - Controllo delle emissioni
 - Salvaguardia della salute degli operatori
- Qualificazione prodotti
 - Controllo dell'assenza di amianto
 - Verifica del contenuto di altri inquinanti
 - Verifica del possibile riutilizzo del materiale

La suscettibilità dei minerali dell'amianto al riscaldamento condotto alle alte temperature comporta che, nel processo, intervengano modifiche sia nella composizione chimica che nella struttura stessa del materiale, modifiche accompagnate dalla formazione di nuovi ossidi e silicati. Tali processi termici si basano su tecnologie ampiamente provate, con costi non più proibitivi, e permettono di trasformare i rifiuti di amianto in materiali inerti.

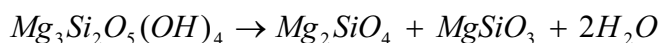
Di seguito vengono analizzate differenti tipologie di trattamento dei RCA, ponendo l'attenzione sulla tecnologia utilizzata, sulla natura del prodotto di input e di output del processo.

L'Aspireco s.r.l.(Gavardo-Brescia) ha brevettato (Europeo n. 034 4563 Italiano n. 20799-MI-A/88) un tipo di trattamento di natura termica da applicare al cemento amianto di natura friabile. Il trattamento viene proposto in modo specifico per l'inertizzazione dell'amianto crisotilo (in quanto il crisotilo è presente circa per l'80% dei RCA) e risulta particolarmente vantaggioso per il fibrocemento. Tuttavia con alcune modifiche (temperature, gradienti termici ecc.) tale processo può essere impiegato con successo per la inertizzazione degli amianti di anfibolo quali amosite e crocidolite.

Il procedimento di inertizzazione si realizza mediante azione termica che consente di eliminare le molecole di acqua di formazione presenti nella struttura, trasformando l'amianto crisotilo fibroso in altro silicato non fibroso ed inerte (la forsterite, che è un minerale inerte, appartenente alla famiglia dell'olivina).

Scarti industriali, demolizioni, scoibentazioni e materiali vari contenenti amianto crisotilo sono trasformati in maniera irreversibile, mediante la modificazione delle caratteristiche chimico fisiche del crisotilo, in materiali riutilizzabili.

Il meccanismo di decomposizione dell'amianto crisotilo avviene in due stadi: deidrossilazione e decomposizione. La decomposizione termica corrisponde all'equazione



L'amianto crisotilo, da solo o presente in materiali inerti (fibrocemento), trattato mediante riscaldamento modifica il sistema cristallino e perde l'abito fibroso trasformandosi in altri silicati non fibrosi ed inerti. Campioni di amianto crisotilo, (di diversa provenienza: canadese, rodesiana, sud africana ed italiana), e materiali contenenti crisotilo in percentuale compresa tra il 10 ed il 30% sottoposti a trattamento termico, hanno mostrato presenza di amianto crisotilo residuo inferiore al limite di rilevabilità strumentale, avendo condotto analisi mediante la diffrazione RX, tecnica analitica normalmente utilizzata per l'identificazione delle sostanze cristalline.

Una campagna sperimentale in un impianto pilota ha evidenziato l'efficacia del processo anche per il trattamento di quantità massive di materiali. La validità e la novità del processo di inertizzazione realizzato a temperature relativamente basse (prossime al limite dell'intervallo inferiore che consente la modifica del sistema cristallino (580/590°C), si realizza grazie alla conformazione dell'impianto di trattamento e delle modalità di gestione dello stesso: rampe di temperatura, velocità di avanzamento del materiale all'interno del

forno ecc. Il tempo di trattamento necessario per la completa trasformazione del crisotilo è funzione di diversi parametri quali: quantitativo di materiale da trattare, conformazione, spessore, calore fornito nell'unità di tempo ecc.

Il forno di trattamento può assumere diverse configurazioni: a tunnel, a suola rotante o rotativo a seconda dei quantitativi e della tipologia dei materiali da trattare. Quale combustibile è preferibile l'uso di metano o altri gas liquefatti (oppure corrente elettrica) ciò al fine di contenere le emissioni in atmosfera di gas di combustione.

Analogo procedimento può essere utilizzato per l'inertizzazione dell'amianto crisotilo conglobato in materiale plastico (ad esempio in materiale vinilico), in tal caso però i fumi derivanti dalla pirolisi organica dovranno essere trattati in post combustore.

Prove tecnologiche hanno confermato che il prodotto di risulta del trattamento di fibrocemento può trovare largo impiego come filler nel cemento Portland, in aggiunta ai possibili utilizzi come materiale di riempimento o refrattario.

Il processo proposto viste le temperature di esercizio "*modeste*" e la possibilità di riutilizzare i materiali in quanto completamente inertizzati, risulta vantaggioso sia a fini ecologici che economici ed è certamente competitivo rispetto ai principali processi di inertizzazione (chimica o fisica) attualmente in sperimentazione.

Per quanto riguarda la compatibilità dell'impianto con la componente aria, l'alimentazione del forno a gas metano, le modalità di svolgimento del ciclo produttivo, i sistemi adottati nelle singole fasi lavorative e nel trattamento e depurazione degli effluenti, consentono di affermare che la realizzazione dell'impianto di trattamento non comporta modifica alcuna allo standard di qualità dell'aria e dell'ambiente circostante. Nel caso di trattamento termico di fibrocemento, vista la tipologia di forno adottato (a tunnel, a suola rotante o rotativo), le emissioni sono costituite essenzialmente dai gas di combustione del metano. Nel caso di trattamento di crisotilo in matrice organica è evidente che i fumi vanno trattati in postcombustore, non per eliminare l'amianto ma per eliminare i composti di pirolisi delle sostanze organiche. Tutte le fasi e le operazioni del ciclo produttivo sono inviate ad un unico camino di emissione in atmosfera presidiato da un sistema di filtrazione composto da: filtro di marcia, iperfiltro e filtro di riserva; si stimano concentrazioni di polveri residue allo scarico, dell'ordine di 0,1/ 0,5 mg/Nm³, ed assenza analitica di amianto < a 10 µg/Nm³ (limite di rilevabilità analitica).

La componente acqua durante la normale conduzione dell'impianto non è interessata di norma ad alcun tipo di inquinamento, in quanto non viene utilizzata nel ciclo produttivo.

Gli stoccaggi del materiale da trattare richiedono la realizzazione di apposite aree attrezzate, condotto in conformità ai disposti della normativa vigente e secondo norme di buona tecnica. Il suolo non è pertanto soggetto a eventuali forme di inquinamento.

Dal processo di trattamento si ottengono materiali riutilizzabili o comunque rifiuti recuperabili.

La **ARI Technologies, Inc.** ha studiato una tecnologia di conversione termochimica dell'amianto che prevede l'utilizzo combinato di trattamenti chimici e calore allo scopo di realizzare la re-mineralizzazione dell'amianto e di altri minerali silicatici. Questo processo consente di perseguire diversi obiettivi: ottenere la conversione dell'amianto in altre forme minerali senza passare per la fusione; la trasformazione delle componenti organiche, presenti nel rifiuto da trattare, attraverso la reazione di pirolisi e/o ossidazione; l'immobilizzazione di metalli e radionuclidi, eventualmente presenti nel rifiuto.

Nel trattamento l'MCA viene inizialmente ridotto in piccoli pezzi e mescolato con agenti di flussaggio, brevettati, per poi essere riscaldato. L'agente di flussaggio, ad elevate temperature, circa 2200 °F, permette una rapida re-mineralizzazione dell'amianto mentre i metalli tossici sono stabilizzati in un prodotto sinterizzato. L'attrezzatura del processo consiste di quattro sistemi principali che provvedono a: 1) preparazione dell'alimentazione, 2) conversione nel forno rotante 3) trattamento dei gas di uscita 4) rimozione del prodotto in uscita.



Figura 1- Sistema di conversione termochimica della potenzialità di 10ton/giorno

Il processo è stato completato nell'agosto 2002 e condotto su i materiali di amianto provenienti dal Savannah River Site (SRS) trattando la quantità di 10 ton/giorno di MCA contaminati da metalli o radionuclidi, la cui presenza comporta difficoltà e costi onerosi per quanto riguarda lo smaltimento in discarica. Lo scopo del trattamento è quello di ottenere un materiale che, secondo quanto prescritto dalle norme del codice federale degli

Stati Uniti (40 CFR 61.155) possono essere considerati non più asbestosi. Il tempo di residenza richiesto per completare la conversione dell'amianto può essere ridotto da 50 a 20 minuti.

I costi della conversione termochimica adottata, se si escludono i costi di trasporto del rifiuto, variano entro un intervallo che va dai \$175 ai \$225 per tonnellata trattata, considerando un impianto che elabora 37 ton/giorno. Al momento, se si considera che, negli USA, il costo della messa a discarica per i materiali di amianto, che non contengono altri inquinanti, è di \$ 50- 100 per ton, la metodologia di trattamento qui esposta non risulta competitiva; al contrario essa è degna di considerazione nel trattamento di MCA con la presenza di PCB (bifenile policlorurato), metalli e radionuclidi.

La società **ABCOV** ha brevettato un trattamento volto alla modifica della struttura cristallina dell'amianto, riconosciuto dall'ente federale dell'EPA, che si avvale dell'utilizzo di sostanze chimiche ed opportune procedure anch'esse brevettate.

E' un trattamento non termico, che prevede un processo di decomposizione che avviene ad elevata velocità, con lo scopo di convertire l'amianto od i materiali contenenti amianto in un prodotto sabbioso, innocuo, non tossico, richiedendo un tempo di circa due ore. Il silicio e i piani di ossigeno vengono attaccati dallo ione fluoro con conseguente distruzione della struttura cristallina.

Vengono utilizzate le seguenti sostanze:

- **ABICOV-T**: un tensioattivo utilizzato per l'iniziale bagnatura e rimozione del materiale contenente amianto, per accelerare la rimozione di certi materiali contenenti amianto, per fornire una superficie priva di asbesto dopo la pulitura finale, eliminando la necessità di procedere ad un trattamento di incapsulamento, e, aspetto più importante, dà il via al processo di conversione;
- **ABICOV-C** : un'emulsionante utilizzato nella fase finale di conversione dell'amianto rimosso;
- **ABCOV-R, ABCOV-R1**: utilizzati per rigenerare la soluzione di **ABICOV-C**;
- **ABCOV-W**: per neutralizzare la superficie in cui è stato asportato l'amianto con **ABICOV-T** e le superfici degli utensili utilizzati.

Questo processo consente di distruggere l'amianto, nelle sue forme di crisotilo e amosite, e, allo stesso tempo, i metalli, radioattivi e non, quali piombo, cromo, cadmio. La tipologia di impianto è molto flessibile: si può costruire in un luogo in cui si prevede di realizzare una stazione permanente di abbattimento dell'amianto ma è offerta anche l'alternativa di attuare un impianto mobile, montato su un rimorchio, che lavora in depressione, qualora questa scelta risulti più vantaggiosa.

La **PILEMA s.r.l.** (Verona) è un'azienda che si occupa di trattamento di rifiuti contenenti amianto e non, con lo scopo di per ottenere prodotti inertizzati utilizzando medie-alte temperature. Il tipo di rifiuto trattato può essere qualunque e per quanto riguarda l'amianto si parla di cemento amianto e di amianto in matrice friabile.

Il processo di trattamento dell'amianto si snoda attraverso un preciso iter che prevede il susseguirsi di diverse fasi che vanno dalla raccolta e trasporto del materiale contenente amianto allo scarico del MCA nell'impianto, al trattamento di inertizzazione vero e proprio fino al controllo dei requisiti posseduti dal prodotto ottenuto dalla lavorazione.

Tecnologia- Vengono utilizzati Roll-off container per la raccolta del MCA, direttamente trasportati sul sito da bonificare. Questi containers, una volta riempiti e chiusi ermeticamente, sono indirizzati all'impianto di trattamento, dove vengono pesati e stoccati. Il processo di scarico è molto delicato e avviene tramite un carrello che preleva il container dall'area di stoccaggio e lo attracca alla zona di lavorazione. La congiunzione del container con la zona contaminata interna di lavorazione è stagna, il collegamento è controllato in automatico. Per evitare dispersione di fibre tutti gli impianti di stoccaggio e di trasporto interno del prodotto, sono tenuti in costante depressione controllata.

La tecnologia industriale si basa sui brevetti ASBESTEX e KVT. Il processo di inertizzazione avviene in un forno rotativo, in cui il materiale, preventivamente frantumato, viene introdotto tramite coclea. Si opera ad una temperatura di 1300 °C impiegando un tempo di circa un'ora.

Prodotto finale- Come prodotto di questo trattamento si ottiene una polvere inerte, di colore giallo-marrone, del peso di circa 800g/l che risulta completamente libera da tracce o residui d'amianto, con forme cristallografiche stabili ed aventi ottime caratteristiche idrauliche. La sua composizione chimica varia in base al rapporto fra cemento amianto e amianto friabile; se tali componenti sono presenti rispettivamente nelle seguenti proporzioni : 90% C.A.-10 % A.F, il prodotto finale presenterà una composizione media di:

CaO	60 %
MgO	9 %
Al ₂ O ₃	3 %
SiO ₂	20 %
SO ₃	3 %

Trattamento Amianto

Allegato 3

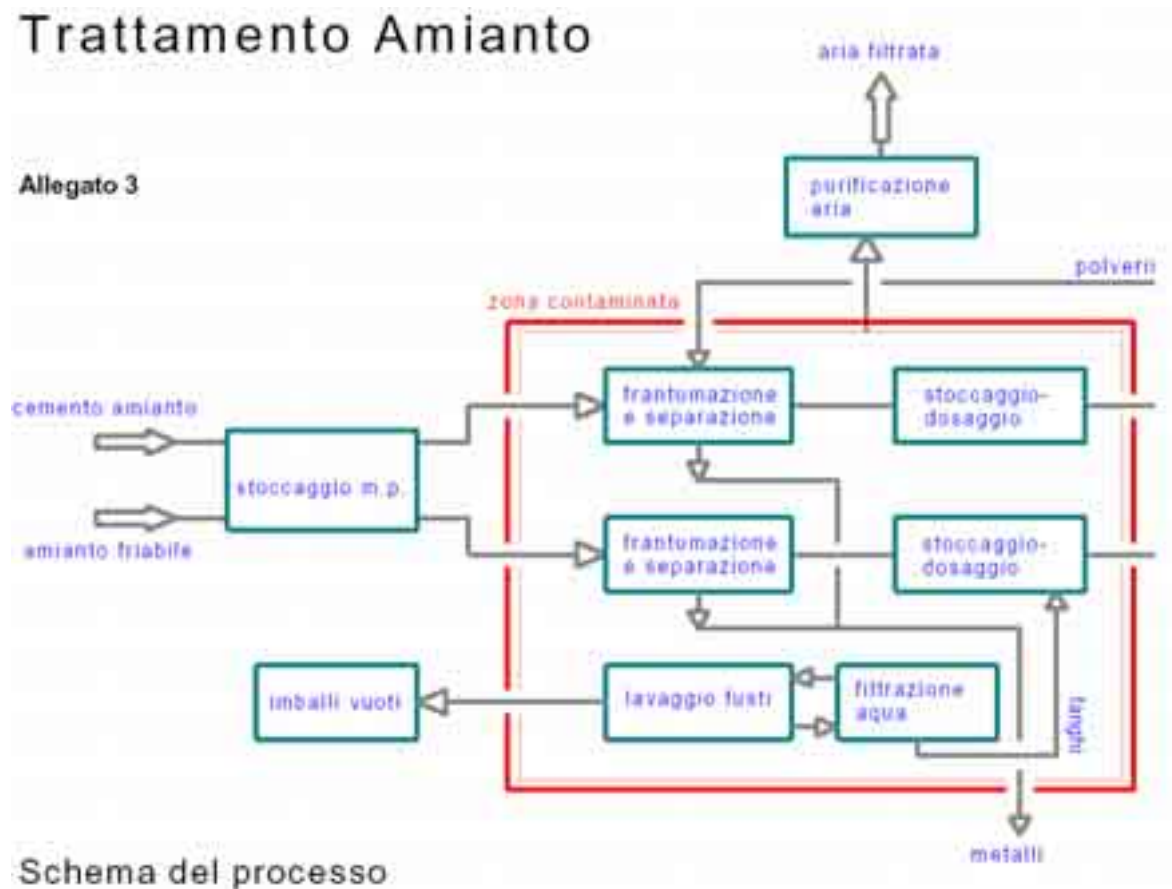


Figura 2

Un efficiente scambio termico permette di ridurre al massimo il consumo d'energia calorica. Il prodotto ottenuto attraversa poi un secondo forno per essere raffreddato e di seguito viene immesso nei serbatoi di stoccaggio.

Vengono effettuati in continuo piccoli campionamenti di prodotto per controllare l'assenza d'amianto. Tutta la metodica analitica è stata controllata ed approvata da un Ente indipendente.

In Germania il prodotto inerte ha l'autorizzazione al riutilizzo nel settore edile, come additivo al calcestruzzo e come materia prima per laterizi.

Costi- L'impianto esistente, fisso, di tipo industriale, in avanzato stato di progettazione, consente di trattare 1000 ton/anno ma secondo una stima la realizzazione di un impianto della capacità di trattamento di 36000 ton/anno consentirebbe di trattare una produzione giornaliera 108.000 Kg/giorno, richiedendo un costo per l'impianto tecnologico di 7.000.000 euro e rispettivamente un costo gestione ed un costo di trattamento (utente) di circa 0,12 euro/kg e 0,15 euro/Kg.

La società **ASSING S.p.A.** (Monterotondo-Roma) propone di applicare a qualsiasi RCA la tecnologia ULTRAMAC, per operare una trasformazione mecano-chimica dell'amianto.

Il processo ULTRAMAC, per ora testato su un impianto pilota, si basa sulla trasformazione a livello molecolare del materiale mediante utilizzo di energia meccanica: l'ossidrilite presente nella struttura dell'amianto viene progressivamente eliminato, provocandone il collasso strutturale, analogamente a quello che si ottiene durante un'azione termica ad elevata temperatura. Pertanto, in modalità del tutto simili a quelle riscontrate durante una fusione, i materiali sottoposti al trattamento ULTRAMAC subiscono un'amorfizzazione rapida, ma a costi di gran lunga inferiori qualsiasi altro tipo di trattamento termico.

Tecnologia- In mulini chiusi, sotto depressione con ciclone di ripresa d'aria e riciclo a ciclo chiuso dell'aria utilizzata avviene la preventiva deferrizzazione e prefrantumazione del materiale di rifiuto.

I frammenti del materiale vengono immessi in modo pneumatico nel reattore mecano-chimico, dove si attua la parte principale del processo.

Il materiale che viene prodotto dagli impianti è una polvere amorfa che ha una superficie specifica superiore ai 75 mq/g, che è stata testata come additivo nei cementi, al pari della silice fume.

Le caratteristiche di elevata superficie specifica permettono, tra l'altro, un'elevata reattività del materiale finale, tale da poter essere utilizzato come materiale catalizzatore.

Questa polvere amorfa viene trasferita ad un pelletizzatore ad umido, che provvede a formare delle pillole di 1 - 2 cm di diametro. Le pillole vengono insilate per il successivo riutilizzo come additivi per i cementi o come inerti. La morfologia del preesistente materiale viene completamente demolita e non si hanno più forme fibrose di alcun tipo, mentre il materiale finale assume una struttura spugnosa; al contrario, la composizione chimica rimane la stessa di quella iniziale, fatta eccezione per l'acqua del materiale e di parte della CO₂ proveniente dalla frazione carbonatica.

Il trattamento ULTRAMAC permette di trattare qualsiasi tipo di materiale contenente amianto, compresi i materiali in matrice plastica o resinosa che possono creare problemi ai trattamenti termici per i fumi.

I maggiori vantaggi della tecnologia ULTRAMAC sono:

- costo ridottissimo di trattamento e gestione
- assenza di qualsiasi emissione reflua, sia essa gassosa o liquida;
- possibilità di accendere o spegnere l'impianto in qualsiasi momento senza problemi di messa a regime (tempi di riscaldamento ecc.)
- applicabilità del materiale finale immediata.

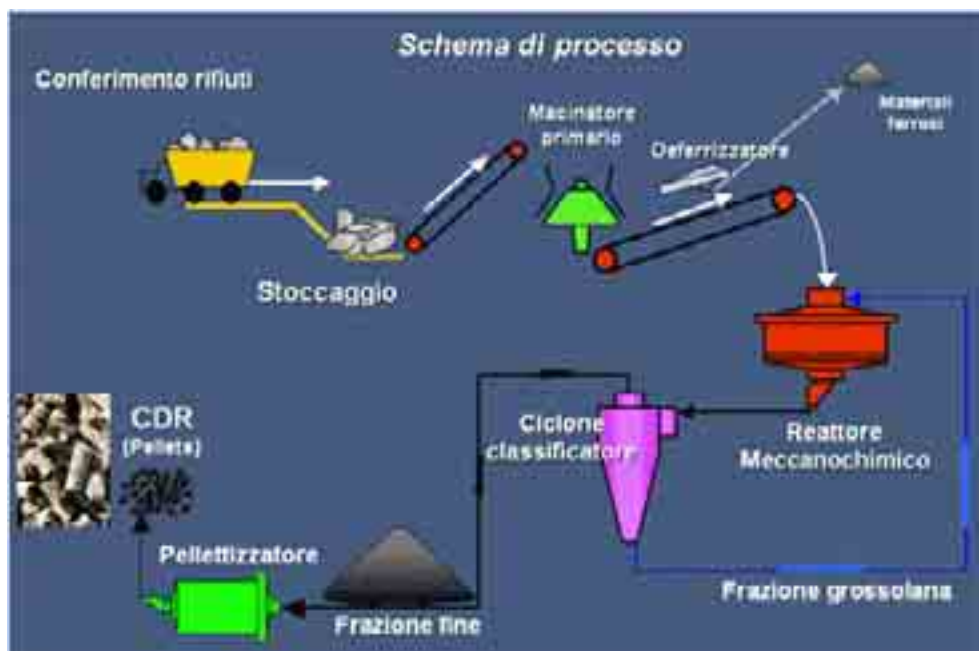


Figura 3

Impatto ambientale- La tipologia del processo, non permette alcun tipo di emissione gassosa o liquida.

Il veicolo dei materiali tra le varie porzioni dell'impianto è aria, pompata pneumaticamente, che viene riciclata interamente all'interno dell'impianto stesso e, attraverso un ciclone e filtri assoluti HEPA le polveri captate vengono re-immesse nel reattore.

Il trattamento non produce alcun gas, in quanto le temperature raggiunte non superano mediamente i 60°C, o reflui liquidi, in quanto non esiste alcuna forma di impasto o di reattivo chimico.

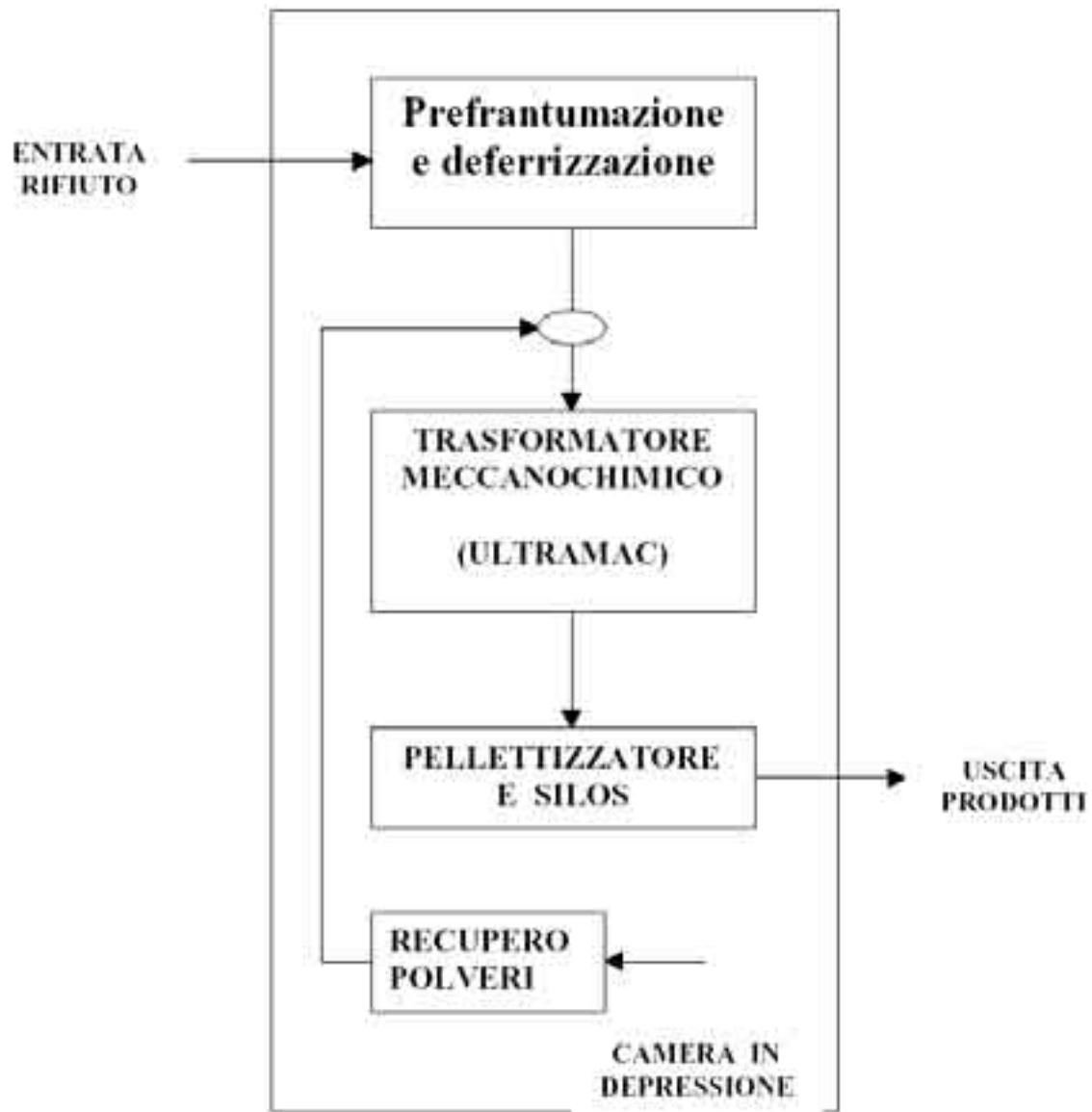


Figura 4 - Schema a blocchi

Prodotto finale- Il prodotto finale permette il riutilizzo come accelerante di presa o inerte nell'industria del cemento con un valore commerciale di 0.01-0.03 euro/kg altrimenti rappresenta un rifiuto da destinare alla discarica per inerti. In questo ultimo caso l'adozione del processo meccano chimico consente una riduzione del 65% del volume iniziale ed ha

caratteristiche assolutamente paragonabili a quelle degli additivi di presa più sofisticati, ma esente da silice amorfa o tridimite, che viceversa sono attivi dal punto di vista biologico.

Costi- Una stima su un impianto, di tipo mobile, della potenzialità di 20 mila ton/anno prevede una produzione giornaliera di 100000 kg/giorno richiede un costo dell'impianto di 770.000.000 euro e un costo gestione: ~ 110.000 euro/anno, costo trattamento (utente): 0.015 euro/Kg.

La **Regency International Group Ltd** (London) è titolare di un brevetto per il trattamento di inertizzazione di diversi tipi di materiali contenenti amianto che spaziano dal cemento amianto, al materiale in matrice friabile fino alle note pavimentazioni in vinil-amianto. Si tratta di un processo di tipo termo-chimico, che porta alla produzione di un pietrisco, in cui non è rilevabile la presenza di materiale fibroso, utilizzabile nell'industria delle costruzioni.

La tecnologia converte, dal punto di vista mineralogico, rifiuti pericolosi, contenenti amianto e bifenile policlorurato, in materiali inerti.

Sono esistenti impianti di tipo industriale, nelle varianti di tipo fisso e mobile; questa ultima tipologia viene realizzata tramite due unità trasportabili da rimorchio, contenenti l'unità mobile di distruzione del PCB- MCA.

Tecnologia- Il processo richiede una preventiva triturazione dell'MCA effettuata tramite l'utilizzo di una macchina trinciatrice che consente di ridurre il rifiuto ad una dimensione inferiore ad un pollice. Il materiale viene poi fatto cadere in una macchina che provvede a mescolare e trasportare l'MCA e il PCB, tramite un sistema a vite, e contemporaneamente avviene l'applicazione a spruzzo di un agente mineralizzante acquoso alcalino. Successivamente il rifiuto viene trasferito ad un focolare rotante all'interno del quale avviene il riscaldamento dei materiali ad una temperatura compresa tra i 2000 ed i 2350° F, riscaldamento ottenuto tramite un sistema elettrico e mantenuto per un tempo di 20-60 minuti. Il prodotto trattato, privo di MCA e PCB, rimosso dal forno, viene raffreddato e drenato e convogliato in bidoni di contenimento. Una sezione dell'impianto è destinata al trattamento dei gas prodotti dal processo: essi vengono dapprima convogliati in una seconda camera di combustione, in cui si mescolano con l'aria fresca di combustione, vengono ulteriormente ossidati passando in un post bruciatore mantenuto nel range di temperatura di 2200-2450° F, per poi essere spenti mediante l'utilizzo di acqua potabile, che permette di passare dal valore di temperatura di 2300° F a 250° F in un tempo di un secondo. Infine, il gas, lasciando lo spegnitore, entra in una camera di assorbimento dei gas acidi e poi nello scrubber. Le operazioni descritte vengono schematizzate nel diagramma di flusso in fig.

Prodotto finale- Il trattamento di amianto friabile permette una riduzione di volume del 90% rispetto al valore iniziale. Il prodotto, come si è detto, è del tutto privo di fibre di amianto e pertanto totalmente innocuo. Si presenta nella forma di un detrito grossolano,

tipo breccia, dal valore economico di 0,01 euro/kg, e pertanto offre la possibilità di essere impiegato come materiale con cui realizzare massicciate stradali.

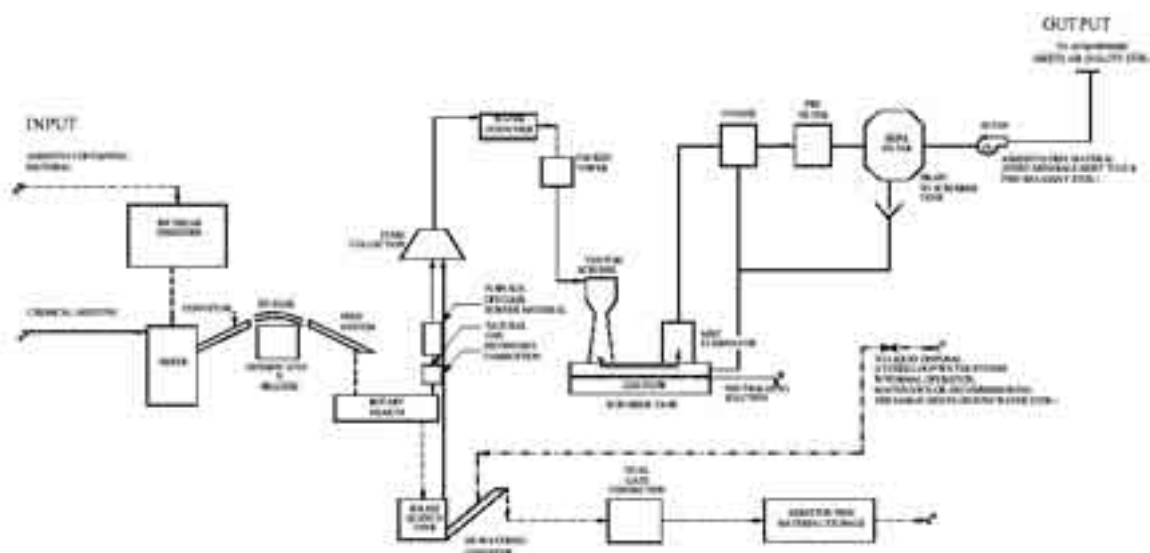


Figura 5- Diagramma di flusso delle operazioni di trasformazione di MCA e PCB

Impatto ambientale- Tutto il processo funziona in depressione e l'aria viene inviata all'esterno tramite un filtraggio HEPA (high environmental particulate air), mentre l'acqua utilizzata dal processo è contenuta in un sistema a circuito chiuso. L'analisi del gas in uscita dal processo fornisce i seguenti risultati per la composizione:

N ₂	2755 lbs/hr
O ₂	678
CO ₂	169
HCl	27 ppm (max) > 99.85% scrubber Efficiency
SO ₂	13 ppm (max)

Costi- Un impianto capace di elaborare 50mila ton/anno e quindi con una produzione giornaliera di circa 150.000 kg/giorno richiede, approssimativamente, un costo di installazione di 16.5 m di euro, ed all'utente, per il trattamento effettuato, un costo di circa 0,12 euro/kg.

Nuovi Studi per il trattamento dei MCA

Il *Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti d'America* ha commissionato nel 2000 uno studio per l'individuazione di soluzioni alternative al conferimento in discarica dei rifiuti contenenti amianto. In particolare è stato affrontato il problema delle condotte ricoperte di amianto, presente nella forma mineralogica dell'amosite in associazione con l'idromagnesite. Per esse è stata prevista l'adozione di un trattamento di tipo chimico-termico, avente come scopo l'inertizzazione delle fibre di amianto; è il processo della ***Dissoluzione Caustica***.

Questa metodologia di trattamento è stata inizialmente sviluppata per la dissoluzione dei filtri di fibre di vetro contaminati. Essa si avvale dell'utilizzo di acido caustico e prevede l'impiego di una soluzione al 5% in peso di NaOH che agisce alla temperatura di 90° C e per un tempo di 48 ore. La sperimentazione ha portato ad osservare che le fibre di vetro si convertono in gel di silice e dopo il trattamento con NaOH gli elementi dei filtri risultano puliti. Per accelerare il processo e, allo stesso tempo, garantirne la totale conversione si procede all'invio di aria nella vasca. Le soluzioni utilizzate nel processo di dissoluzione e i residui della stessa, sono elementi vetrosi che vengono mandati in camera di fusione e sottoposti ad un successivo trattamento di vetrificazione.

Questa metodologia è stata brevettata per il trattamento di tutti i materiali contenenti un alto livello di silicati fibrosi, incluso l'amianto.

L'interesse è volto, in particolare, come si è detto, al trattamento delle condotte rivestite di amianto dal momento che questo è il materiale che costituisce in prevalenza il RCA nel caso dello studio effettuato, e allo stesso tempo quello che crea maggiori difficoltà di trattamento. Ricerche condotte su un elemento di lunghezza pari a 7" della condotta integra, ovvero non privata della copertura di asfalto o dei fili metallici, hanno portato alle seguenti osservazioni:

- nessuna modifica interviene nel materiale di asfalto, come confermato da un'analisi di diffrazione ai raggi X a seguito della fase di dissoluzione;
- il materiale contenente amianto subisce una conversione parziale: l'idromagnesite viene convertita, mentre l'amosite parzialmente. L'analisi ai raggi X del materiale che ha subito modifica evidenzia la presenza di idrossido di magnesio e carbonato di sodio come prodotti di decomposizione della fase non asbestosa, ovvero dell'idromagnesite. La struttura cristallina dell'amosite è parzialmente distrutta, diventando così amorfa.

- la soluzione di NaOH contiene alte concentrazioni di alluminio e silicio provenienti dalla dissoluzione del minerale dell'amianto

La conversione del MCA in NCS (non cristalline solid) viene completata da un processo di vetrificazione finale. Viene ottenuto un vetro Palex, vetro di silicato di magnesio, inventato da Riedel in Cecoslovacchia nel 1939. Rispetto al più comune vetro boro-silicatico, il vetro Palex si differenzia per la sostituzione di B_2O_3 con MgO . La motivazione di ciò sta nel fatto che i vetri Palex sono molto tolleranti nei confronti di un alto contenuto di MgO e CaO , ossidi presenti nei fillers usati nel realizzare il rivestimento di amianto di tubazioni. Le temperature di fusione raggiunte si differenziano in base al tipo di additivi utilizzati nel processo di vetrificazione: nel caso siano presenti sostanze volatili pericolose o radioattive, come additivo viene utilizzato Li_2O lavorando alla temperatura di circa $1150^\circ C$ (scelta che può essere dettata anche da esigenze costruttive della camera di fusione); se, al contrario non si hanno particolari precauzioni da rispettare, l'utilizzo dei più economici K_2O e Na_2O comporta il raggiungimento di $1250^\circ C$ e più. In ogni caso, l'MCA viene convertito in una forma amorfa, annullando il pericolo di inalazione di fibre.



Figura 6 - Corda in amianto utilizzata come coibente termico

Il processo di trattamento dell'MCA in una soluzione calda di NaOH, agendo totalmente in condizioni bagnate, minimizza così il rischio di inalazione di fibre. Per lo stesso scopo nella camera di fusione si opera ad una pressione leggermente inferiore a quella atmosferica.

Opportuni accorgimenti tecnici permettono inoltre di migliorare i risultati ottenibili dal processo: ad esempio, la rimozione del materiale ricoprente, di asfalto, permette una migliore reazione tra l'MCA e la soluzione e analogamente un'agitazione del recipiente contenente la soluzione favorisce il procedere del processo di dissoluzione.

Per una decontaminazione del metallo delle condotte, con lo scopo di un futuro riutilizzo delle stesse, può essere utilizzato un bagno in HNO_3 in quanto dalla reazione con l'acido si formano ossidi e idrossidi di ferro che liberano l'MCA presente sulla superficie delle condotte. L'MCA così ottenuto e questi ossidi/idrossidi sono poi interessati dalla fase di vetrificazione. La soluzione di NaOH è uno dei fondenti chimici per la formazione del vetro, necessari nel processo di vetrificazione del MCA.

Si può operare una distinzione in base al fatto che l'MCA sia radioattivo o meno. Se non lo è, l'MCA, dopo essere stato trattato, viene riversato fuori dalla camera di fusione e posto in recipienti dove si raffredda spontaneamente oppure, tramite l'ausilio di acqua, si procede al suo spegnimento. Il prodotto finale è un vetro totalmente amorfo non pericoloso e, come tale, può entrare a far parte del mercato del riciclo come è per le condotte. Nel caso in cui, al contrario, l'MCA fosse radioattivo o sospetto tale, il materiale vetroso, che si ottiene, ha la capacità di legare, dal punto di vista atomico, ogni costituente radioattivo o pericoloso, incluse le vernici al piombo. Il vantaggio che ne risulta, pertanto, è quello di ottenere un notevole taglio dei costi di smaltimento /interrimento conseguente ad una riduzione dei volumi da destinare a discarica. Infatti il processo di vetrificazione comporta una riduzione del volume del materiale trattato esprimibile attraverso la seguente espressione:

$$\text{RiduzioneVol}\% = \left[1 - \left(\text{Vol}_{\text{glass}} / \text{Vol}_{\text{ACM}} \right) \right] * 100$$

Nel caso dello studio condotto tale riduzione raggiunge il valore del 90,6%.

Nell'ambito dei **trattamenti termici**, si collocano quelli che prevedono l'utilizzo di **microonde**: essi mostrano il vantaggio di una semplificazione del processo stesso e di un uso dell'energia più razionale.

Uno studio per conoscere gli effetti e gli eventuali vantaggi di tale procedura è stato condotto dall'*ENEA*(2003) su cartoni-amianto aventi la seguente composizione: 90% crisotilo, 10% legante organico. Il gruppo di emissione delle microonde, alloggiato in un contenitore di acciaio chiuso ermeticamente, è costituito da tre magnetron, ciascuno della potenza di 6 kW, i quali generano microonde della frequenza di 2,45 GHz. Sono stati utilizzati campioni delle dimensioni di 100x150x10 mm disposti su due livelli paralleli di mattoni, posti in una scatola di legno riempita di sabbia umida.

La variazione della composizione del campione in funzione del tempo e della temperatura consentono di seguire istante per istante le modifiche in atto: la materia organica comincia ad essere liberata attorno ai 300-350 °C mentre a temperature maggiori si osserva il rilascio di acqua cristallizzata. L'analisi del DTA (Differential Thermal Analysis) permette di individuare dei picchi a cui sono associabili precise reazioni chimico – fisiche: a temperature più basse si hanno reazioni di decomposizione della matrice organica, mentre a 650-750 °C si ha la de-idratazione dell'acqua di struttura, un picco a 845 °C mostra una fase di transizione che ha luogo in assenza della modifica del peso del campione. In questa ultima fase si ha la trasformazione del crisotilo in forsterite.

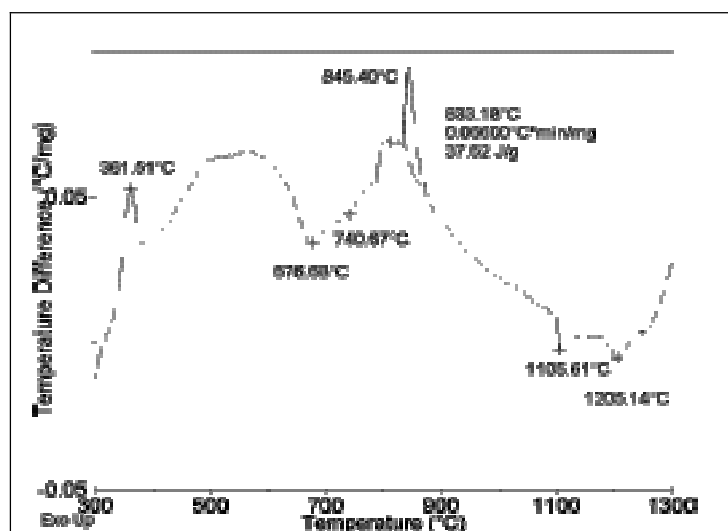


Figura 7 - Differential Thermal Analysis

La composizione chimica di questo minerale (Mg_2SiO_4) è molto simile a quella del crisotilo ma essi appartengono a due famiglie di minerali silicatici diverse: il primo a quello delle olivine e presenta una struttura cristallina più semplice, il secondo a quello della serpentinite. Lo spettro ad infrarossi del materiale prima e dopo il trattamento mostra le evidenti modifiche ottenute: al 3688 cm^{-1} si evidenzia il caratteristico picco del crisotilo dovuto allungamento del legame OH^- che scompare nel campione trattato, così come avviene per picchi dovuti al materiale organico o ai legami Si-O o Mg-O ; al contrario, in corrispondenza di bassi valori di numeri d'onda si osserva un mantenimento della forma dello spettro anche se questo trasla verso frequenze maggiori.

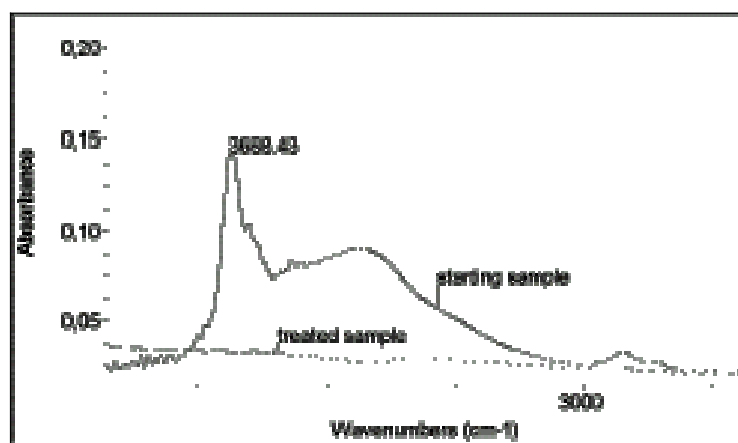
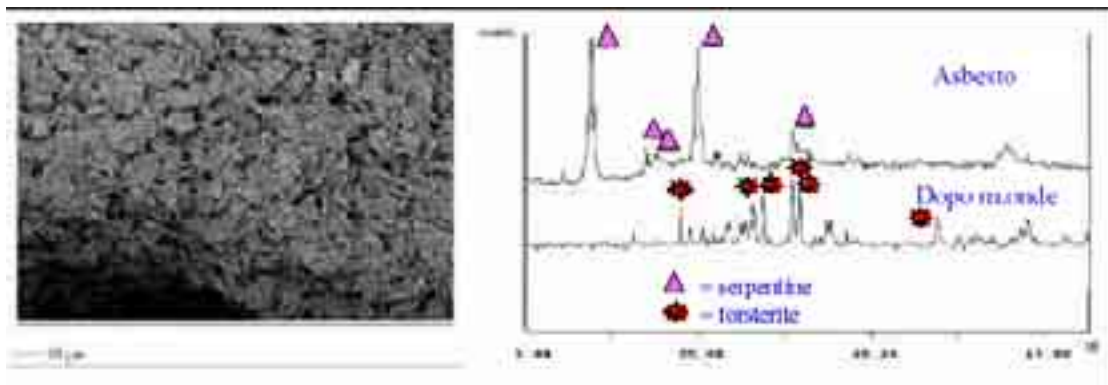


Figura 8 – Confronto tra lo spettro ad infrarossi del campione non trattato e del campione trattato, per alti valori del numero d'onda.

L'assorbimento di microonde permette la trasformazione di crisotilo in forsterite, con un'efficienza dipendente dalla distanza tra il campione e la superficie di applicazione, con l'inconveniente di avere una debole o non omogenea assorbimento delle onde da parte del campione e conseguentemente una dispersione di energia tanto maggiore quanto più la distanza cresce. Alla presenza del legante organico nel materiale si deve l'iniziale assorbimento di microonde e l'incremento di temperatura; intorno ai 600°C cambia il comportamento dielettrico del campione che velocemente raggiunge le temperature di $1100\text{-}1200^\circ\text{C}$ per poi raggiungere un plateau e decrescere fino alla temperatura della camera probabilmente dovute al fatto che le trasformazioni intervenute rendono il materiale trasparente alle microonde.



2 lastre di asbesto , 13 minuti irraggiamento, Pt-30%Rh/Pt-6%Rh (tipo B) termocoppia

- 1000 W forward power @2.45 GHz; Forno Radatherm VPMS (multimodo)
- formazione del silicato di magnesio FORSTERITE (Mg_2SiO_4), innocuo
- Campione non più fibroso (ma scarsa omogeneità del campione)

Figura 9 - Modifiche nel materiale di amianto seguito del trattamento con microonde

I vantaggi maggiori dell'utilizzo delle microonde consistono in tempi di irraggiamento inferiori ai 15 minuti ed un utilizzo razionale dell'energia, in quanto viene scaldato solo il materiale pericoloso ed il forno non ha necessità di preriscaldamento, come avviene nel convenzionale.

Per tale procedura di inertizzazione non sono ancora disponibili dei dati effettivi relativi al costo richiesto; tuttavia, una prima valutazione viene fornita, indirettamente, tramite l'analisi dell'efficienza energetica del processo. In base alle sperimentazioni condotte risulta che l'energia richiesta uguaglia i 10kWh/kg di materiale trattato e per la trasformazione del campione viene utilizzata un'aliquota pari a 0,43 del totale dell'energia assorbita, valore, comunque, strettamente dipendente dal rapporto tra superficie e volume. Il corrispettivo costo dell'energia richiesta, sebbene copra solo una parte dei costi totali del processo, può essere utilizzato come parametro per effettuare una comparazione con il prezzo della messa a discarica dei materiali di amianto; se questa ultima operazione richiede 0,5-2 Euro/kg, l'inertizzazione tramite microonde risulterebbe competitiva a seguito di un consumo di energia pari a 1 kWh/kg di amianto trattato.

Si sta ora iniziando a verificare in quali casi, tale materiale inerte (forsterite), possa essere riutilizzato, come materia prima, all'interno di processi produttivi di materiali ceramici quali refrattari, piastrelle e mattoni. Sono in corso studi volti a determinare le

percentuali massime di amianto inertizzato, che è possibile introdurre nella preparazione delle miscele senza far scadere le caratteristiche tecniche del prodotto finale ottenibile.

CONCLUSIONI

Il D.M. 13 marzo 2003, criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica, che entrerà in vigore il 16 luglio 2005, destina i materiali contenenti amianto, non preventivamente trattati, in discariche per rifiuti pericolosi, con la richiesta dell'osservanza di norme precise per la ricopertura. Questa soluzione, oltre a comportare oneri di gestione non indifferenti, come si è detto, non risulta una soluzione definitiva per l'eliminazione del rischio amianto.

I processi di inertizzazione si pongono come una valida alternativa a tale soluzione. Essi, agendo sulla struttura cristallina, meccanicamente, chimicamente o soltanto operando sulla variabile temperatura, permettono al minerale di perdere la caratteristica struttura fibrosa causa della sua pericolosità, dando luogo a nuovi minerali di silicio, del tutto innocui. L'interesse è dettato dal fatto che questi minerali costituiscono una nuova materia prima da utilizzare nella produzione dei leganti idraulici, di refrattari, mattonelle, o da utilizzarsi come inerti. Molti processi nascono come soluzione di trattamento per un tipo particolare di minerale di amianto e, conseguentemente, l'applicazione a MCA di differente natura richiede adeguate messe a punto nelle procedure. D'altronde non bisogna dimenticare che il trattamento consiste di una serie di operazioni preliminari e successive all'effettiva inertizzazione, come l'adduzione del MCA, la preparazione, ad esempio tramite triturazione e separazione di componenti estranee, il trattamento dei fumi di combustione, il trattamento delle acque.

I costi richiesti da tali trattamenti non sempre risultano competitivi con i corrispondenti costi della destinazione in discarica, che di conseguenza viene ancora preferita. Da qui nasce la necessità del procedere della ricerca per rendere i trattamenti di inertizzazione più competitivi, dal punto di vista economico, e non solo limitatamente ai casi particolari in cui i MCA sono presenti in associazione con altre sostanze pericolose. Ma questo auspicio progresso tecnologico dovrà necessariamente essere accompagnato da una cultura del riutilizzo del prodotto non più "amiantato", al di là di pregiudizi, soltanto così favorendo il mercato del riciclaggio.

BIBLIOGRAFIA

- Beone G., De Angelis G., Ferri F., Pagliacci C., Gherzi M., D'Angelo R. - Gli impianti mobili dimostrativi ICAM e TRITAM per il trattamento integrato dei rifiuti da amianto
- CNR - Ambiente: in Italia ancora emergenza amianto – novembre 2002
- CNR,Istituto per la protezione delle piante- Funghi e amianto: potenzialità nel biorisanamento?-CNR Report 2003
- Clarelli S. – Bonifica e smaltimento dell'amianto: stato dell'arte e novità legislative – Ambiente e sicurezza-Il Sole 24 ORE N. 8 del 27 aprile 2004.
- Di Viesto P.,Annibali M., Cardellini F., Marucci G., Sica M., Portofino S.- Asbestos Inertization Through Microwave Thermal Treatment: Materials Characterization And Economic Evaluation – Mat Res Innovat. 2004
- Jantzen C. M, Pickett J. B. – How to recycle asbestos containing materials
- LIFE03 ENV/IT/323-FALL – Interim Report, LIFE project name: Filtering of Asbestos fibers in Leachate from hazardous waste Landfill.
- Marra J. C., Jantzen C. M.- GLASS – AN ENVIRONMENTAL PROTECTOR- American Ceramic Society Bulletin November, 2004
- Mazzotta P.I. M. - Interventi di bonifica amianto
- National Energy Technology, Ari technology - Technology Deployment for Asbestos Destruction – Office of science and technology, September 2002
- Provincia di Pistoia - Piano per la Gestione dei Rifiuti Speciali Pericolosi e non della Provincia di PISTOIA – Volume Terzo
- Ragone P. – Il piano regionale e gli strumenti di prevenzione: Amianto tra cifre e timori.- Basilicata Regione Notizie
- Scheda tecnica – Processi di inertizzazione rifiuti di amianto - Aspireco s.r.l.
- Scheda tecnica – Processi di inertizzazione rifiuti di amianto - Assing s.r.l.
- Scheda tecnica – Processi di inertizzazione rifiuti di amianto - Pilema s.r.l.
- Technical Paper – Asbestos Waste Conversion Processes - Regency International Group Ltd
- Valerisco, Casadio - Materiali a base di amianto - tecnologie e problematiche legate alla dismissione - Gioppichelli Editore

SITI INTERNET

- <http://www.aritechnologies.com> - 04/05/05
- <http://www.netl.doe.gov> - 18/03/05
- <http://sti.srs.gov> - 01/04/05
- www.trisaia.enea.it - 3/03/05
- www.arpav - 21/04/05
- <http://digilander.iol.it/mwag> - 01/04/05
- www.epa.gov - 25/03/05
- www.abcov.com - 04/05/05
- www.assoamianto.it – 18/03/05

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- Decreto Legislativo 15 agosto 1991, n. 277

Attuazione delle direttive n. 80/1107/CEE, n. 82/605/CEE, n. 83/477/CEE, n. 86/188/CEE e n. 88/642/CEE, in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da esposizione ad agenti chimici, fisici e biologici durante il lavoro, a norma dell'art. 7 della legge 30 luglio 1990, n. 212.

(S. ord. alla G.U. n. 200 del 27 agosto 1991).

- Legge 27 marzo 1992, n. 257

Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto.

(S. ord. alla G.U. N. 87 del 13 aprile 1992 – Serie generale).

- Decreto Ministeriale 6 settembre 1994

Normative e metodologie tecniche di applicazione dell'art. 6, comma 3, e dell'art. 12, comma 2, della legge 27 marzo 1992, n. 257, relativa alla cessazione dell'impiego dell'amianto.

(S. ord. alla G.U. N. 288 del 10 dicembre 1994 – Serie generale)

- Decreto Ministeriale 14 maggio 1996

Normative e metodologie tecniche per gli interventi di bonifica, ivi compresi quelli per rendere innocuo l'amianto, previsti dall'art. 5, comma 1, lettera f), della legge 27 marzo 1992, n. 257, recante: "Norme relative alla cessazione dell'impiego di amianto".

(G.U. N. 249 del 22 ottobre 1999 - Serie generale)

-Decreto 20 agosto 1999

Ampliamento delle normative e delle metodologie tecniche per gli interventi di bonifica, ivi compresi quelli per rendere innocuo l'amianto, previsti dall'art. 5, comma 1, lettera f), della legge della legge 27 marzo 1992, n. 257, recante: "Norme relative alla cessazione dell'impiego di amianto".

(S. ord. alla G.U. N. 251 del 25 ottobre 1996 - Serie generale)

- Decreto 13 marzo 2003

Criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica.

(G.U. N. 67 del 21 marzo 2003).

- Decreto 18 marzo 2003, n. 101

Regolamento per la realizzazione di una mappatura delle zone del territorio nazionale interessate dalla presenza di amianto, ai sensi dell'art. 20 della legge 23 marzo 2001, n. 93.

(G.U. N. 106 del 9 maggio 2003).

- Decreto 29 luglio 2004, n. 248

Regolamento relativo alla determinazione e disciplina delle attività di recupero dei prodotti e beni di amianto e contenenti amianto.

(G.U. N. 234 del 5 ottobre 2004).