



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE
(Laurea triennale DM 270/04 – Indirizzo Civile)

**USO DEGLI AGGREGATI RICICLATI
NEL CALCESTRUZZO.**

Relatore: Prof. Ing. Carlo Pellegrino

Correlatore: Ing. Flora Faleschini

Laureando: Fabio Berti

ANNO ACCADEMICO 2011 – 2012

INDICE

| | |
|---------------------------|--------|
| Introduzione | Pag. 1 |
|---------------------------|--------|

CAPITOLO 1: ASR (ALKALI-SILICA REACTION)

| | |
|---------------------------------------|---------|
| 1.1 IL CALCESTRUZZO..... | Pag. 7 |
| 1.2 ASR (ALKALI-SILICA REACTION)..... | Pag. 10 |
| 1.3 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI..... | Pag. 19 |

CAPITOLO 2: AGGREGATI RICICLATI

| | |
|--|---------|
| 2.1 EAFs (ELECTRIC ARC FURNACE SLAG)..... | Pag. 20 |
| 2.2 ALTRE SCORIE DALL'INDUSTRIA SIDERURGICA..... | Pag. 27 |
| 2.3 MSWI BOTTOM ASH..... | Pag. 31 |
| 2.4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI..... | Pag. 35 |

CAPITOLO 3: ESEMPI IN LETTERATURA

| | |
|--|---------|
| 3.1 USE OF INCENERATOR BOTTOM ASH IN CONCRETE..... | Pag. 36 |
| 3.1.1 INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE..... | Pag. 39 |
| 3.2 ESEMPIO EAF SLAG..... | Pag. 39 |
| 3.2.1 INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE..... | Pag. 44 |

| | |
|--------------------------------------|---------|
| <u>CAPITOLO 4: CONCLUSIONI</u> | Pag. 45 |
|--------------------------------------|---------|

BIBLIOGRAFIA

Ringraziamenti

Introduzione

Il riciclo dei rifiuti è il processo di trasformazione dei rifiuti in materiali riutilizzabili, in particolare viene definito come quel processo che permette di riutilizzare un materiale per più cicli di produzione e consumo. Il riciclo è alla base dello sviluppo sostenibile. Esso consente di ridurre il costo dello smaltimento di rifiuti nelle discariche o negli inceneritori. Il riciclo permette di recuperare le materie prime di cui sono composti i rifiuti e rimetterle nei processi di produzione. Inoltre riduce lo sfruttamento delle risorse naturali consentendo un minore impatto ambientale della produzione.

In particolare sono da considerarsi, ai fini della parte quarta del decreto legislativo del 2006 (testo unico ambientale) art. 183, rifiuti: qualsiasi sostanza od oggetto che rientra nella categoria riportate nell'Allegato A. Come esempio di questi troviamo:

- Residui di produzione o di consumo;
- Prodotti fuori norma o scaduti;
- Sostanze divenute inutilizzabili (ad esempio batterie);
- Sostanze divenute inadatte all'impiego (ad esempio acidi e solventi contaminati);
- Residui di processi industriali (ad esempio scorie, residui di distillazione);
- Residui provenienti dall'estrazione e dalla preparazione di materie prime;
- Qualunque materia, sostanza o prodotto la cui utilizzazione è giuridicamente vietata.

Possiamo anche definire, sulla base del D. Lgs. 2006, i rifiuti inerti come rifiuti solidi che non subiscono alcuna trasformazione fisica, chimica o biologica significativa; i rifiuti inerti non si dissolvono, non bruciano né sono soggetti ad altre reazioni fisiche o chimiche, non sono biodegradabili e, in caso di contatto con altre materie, non comportano effetti nocivi tali da provocare inquinamento ambientale o danno alla salute umana in genere.

Il riciclo è una pratica di introduzione abbastanza recente, nata nei paesi industrializzati intorno agli anni Cinquanta per rispondere a esigenze di tipo economico ed ecologico: in primo luogo, infatti, è un sistema intelligente di smaltimento dei rifiuti e un modo per ridurre i consumi energetici e i costi delle

industrie; in secondo luogo è una via da perseguire per risparmiare le risorse naturali del Pianeta. Dal punto di vista ecologico, è l'alternativa più vantaggiosa ai sistemi convenzionali di smaltimento dei rifiuti (accumulo nelle discariche e incenerimento in appositi impianti) che, oltre a non essere più sufficienti per smaltire il sempre crescente carico di rifiuti prodotti, hanno un impatto ambientale non trascurabile.

In questi ultimi anni la crescente attenzione alle problematiche ambientali ha reso sempre più difficoltoso il prelievo da cave naturali degli inerti e, nel contempo, sempre più restrittiva la regolamentazione per la gestione delle discariche dei rifiuti. Per tale motivo i materiali riciclati da attività da costruzione e demolizione (C&DW – Construction and Demolition Waste) e i residui dell'industria metallurgica (es. EAF e BOF slag) stanno rapidamente diventando di grande interesse per le costruzioni civili e non, ai fini del loro utilizzo come aggregati nel calcestruzzo riciclato (Recycled Concrete RC). Questo è essenzialmente dovuto al fatto che in generale negli anni trascorsi si è sempre più incentivato l'utilizzo delle risorse naturali, pensando di poter disporre di una riserva illimitata di materie prime, senza considerare invece che i rifiuti derivanti dalle attività da costruzione e demolizione e i residui dell'industria metallurgica potessero rappresentare un effettivo problema di smaltimento. È chiaro come questo comportamento oggi non sia più sostenibile, in quanto:

- La domanda di aggregati ha generato forti impatti sul territorio a causa di una attività estrattiva che con molta difficoltà riesce ad essere pianificata e regolamentata;
- Il notevole quantitativo di rifiuti proveniente dal settore edile ha generato una domanda di impianti di smaltimento difficile da soddisfare e ha comportato inoltre il frequente abbandono in discariche abusive;
- La produzione di sottoprodotti e di residui dell'industria metallurgica coinvolge grandi quantità di materiali, il cui ciclo di vita può essere esteso;
- L'utilizzo della discarica deve essere considerato come ultima soluzione, privilegiando tutte le azioni possibili per recuperare risorse disponibili dalla gestione dei rifiuti stessi.

Si è quindi giunti alla consapevolezza che lo smaltimento in discarica ai livelli attuali è un'opzione difficilmente sostenibile per il futuro, e per tale motivo si cerca di limitarlo. Quando si parla di calcestruzzi riciclati, generalmente si è portati a pensare a conglomerati con caratteristiche inferiori a quelle offerte da materiali il cui uso è largamente diffuso e consolidato; ad esempio, nel caso di materiali di scarto edilizio utilizzati al posto degli aggregati, se provenienti da idonei impianti di frantumazione, trattamento ed omogeneizzazione, le caratteristiche prestazionali sono equiparabili a quelle dei misti naturali ed i campi di impiego sono quasi tutti quelli dei materiali sciolti da costruzione. Per questo motivo la maggior consapevolezza sulle opportunità di impiego degli aggregati riciclati ha posto l'attenzione degli operatori del settore sull'opportunità del riciclo dei C&DW. In alcuni paesi, al fine di incentivare lo sviluppo della cultura del riciclo dei rifiuti sono state attuate scelte di carattere politico – economico (piani di gestione dei rifiuti, sostegno dei nuovi mercati, ecc.).

Il calcestruzzo, nella sua essenza, è costituito da tre componenti: quello lapideo, chiamato inerte o aggregato, quello collante che ricopre, avvolge e collega i singoli elementi lapidei, e infine l'acqua.

Il cemento Portland è il prodotto ottenuto dalla macinazione del clinker con l'aggiunta del gesso (anidrite) per regolare il processo di idratazione. Il cemento Portland è inoltre in grado di formare una massa (pasta) modellabile che perde in poco tempo la sua iniziale plasticità (presa) e successivamente assume la consistenza rigida tipica delle pietre naturali (indurimento). Oltre alle componenti tradizionali (pozzolana naturale), altri prodotti minerali sono stati introdotti nel processo produttivo dei cementi. Questi includono:

- La cenere volante (fly ash), residuo della combustione nelle centrali termiche a carbone;
- Il fumo di silice, sottoprodotto del processo produttivo delle leghe metalliche;
- La pozzolana industriale, scoria vetrosa della lavorazione di leghe metalliche non ferrose;
- Il calcare di origine naturale.

Il processo di idratazione del cemento è ciò che rende effettivamente fruibile il calcestruzzo come materiale da costruzione. Tale processo è costituito da un complesso sistema di reazioni chimiche tra il cemento e l'acqua, grazie al

quale il calcestruzzo si trasforma da una massa iniziale inizialmente plastica, in un materiale rigido e meccanicamente resistente.

Passando a trattare il ruolo degli inerti, possiamo dire che essi costituiscono una larga categoria di materiali particellari granulari grezzi, usati nelle costruzioni e possono essere naturali, artificiali o riciclati. Per quanto riguarda il termine inerte, pur essendo ormai consolidato nella terminologia tecnica, è improprio poiché questo materiale svolge un'attività di primaria importanza specialmente nel comportamento dei conglomerati, pertanto sarebbe più corretto utilizzare il termine aggregati. Gli inerti, o aggregati, utilizzati in edilizia comprendono in via esemplificativa: sabbia, ghiaia o pietrisco. La caratteristica più evidente dell'inerte è la sua granularità, cioè il fatto che si presenta in forma di granuli sciolti. Quando la dimensione dei singoli granuli non supera i 4 mm l'inerte prende il nome di sabbia, se supera i 4 - 5 mm è chiamato ghiaia, pietrisco o più genericamente inerte grosso. Le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito dipendono fortemente dalle caratteristiche chimico-fisiche degli inerti di partenza, influenzando la resistenza a compressione, la resistenza a trazione e le performance in termini di durabilità del conglomerato finito. Anche dal punto di vista quantitativo gli inerti sono molto importanti, poiché nella massa di un calcestruzzo ordinario rappresentano circa l'80% del peso.

Per quanto riguarda la funzione del terzo componente principale del calcestruzzo, l'acqua, oltre a permettere lo sviluppo della reazione di idratazione del cemento, contribuisce alle proprietà di lavorabilità del calcestruzzo, influenzato dal rapporto acqua/cemento (a/c). Un aumento di questo rapporto provoca un miglioramento della lavorabilità del calcestruzzo fresco, ma un peggioramento di tutte le prestazioni del calcestruzzo indurito, prima fra tutte la resistenza meccanica e la durabilità, penalizzate dall'aumento di porosità della matrice cementizia che consegue all'incremento del rapporto a/c.

Per durabilità del calcestruzzo si intende la capacità di garantire la funzionalità delle strutture per la vita di servizio attesa. Secondo la norma europea ENV 206, recepita in Italia sottoforma di UNI 9858, gli ambienti nei quali l'opera di calcestruzzo è destinata ad essere costruita vengono classificati in base a tipologie (classi di esposizione), per ciascuna delle quali - a seconda del potenziale livello di aggressione per i ferri di armatura o per il calcestruzzo stesso - la norma prevede il rispetto di alcuni vincoli in forma di rapporto

acqua/cemento (a/c), presenza di aria (dove c'è il rischio di gelo), e dosaggio di cemento. L'interazione fra il cemento e l'aggregato produce una reazione, detta ASR (Alkali-Silica Reaction) responsabile di fessurazioni irregolari o espulsioni localizzate di materiale (pop - out) che possono pregiudicare seriamente la durabilità delle opere in calcestruzzo. La reazione alcali – silice (composto del silicio, SiO_2) coinvolge sostanzialmente gli aggregati che contengono una particolare forma di silice, capace di reagire con gli alcali, sodio e potassio, provenienti dal cemento o dall'ambiente esterno, per produrre una reazione espansiva a carattere distruttivo. Gli alcali del cemento (sodio Na, potassio K) possono formare silicati alcalini idrati in presenza di acqua, il cui reticolo cristallino occupa un volume maggiore di quello che occupano nella loro forma non idrata, causando dunque fenomeni fessurativi. Lo stato fisico più comune nel quale si trova la silice è quello cristallino, in minerali come il quarzo, e più raramente quello amorfo, come nell'opale; la silice cristallina è il costituente principale di rocce sedimentarie ad esempio la sabbia. Il danno, provocato dalla reazione alcali – silice, dipende dal tempo ritardato e dal carattere puntuale e disuniforme del fenomeno espansivo che accompagna l'ASR. In sostanza, ciascun granulo di aggregato reattivo, dotato cioè di silice mal cristallizzata o amorfa si rigonfia quando viene a contatto con acqua ed alcali. Questo esempio negativo sulla reattività di un prodotto amorfo rispetto al corrispondente prodotto cristallino, riguarda la silice nei confronti degli ioni alcalini (sodio Na^+ e potassio K^+) presente nella fase acquosa che riempie i pori del calcestruzzo. Il prodotto ottenuto $N(K)-S-H$ indica genericamente un silicato idrato di sodio e/o potassio che si forma a temperatura ambiente, la cui presenza, individuata tramite analisi chimiche, indica l'avvenuto fenomeno espansivo.

Il carattere espansivo dell' ASR determina un'azione ancor più negativa qualora il fenomeno fessurativo si manifesti in prossimità della superficie; la manifestazione del danno può assumere aspetti diversi che includono:

- Micro - fessurazione diffusa con raccolta in superficie di un prodotto biancastro gelatinoso;
- Il sollevamento di un piccolo conetto di calcestruzzo;
- Macro - fessurazione a carattere irregolare.

Attualmente la presenza di silice reattiva nell'inerte rappresenta la più insidiosa forma di degrado del calcestruzzo; ciò dipende dal concorso di più

cause, una tra tutte la presenza di umidità e quindi si verifica più frequentemente in ambienti esterni. A causa dell'instabilità del fenomeno e della difficoltà di diagnosticare preliminarmente la reattività della silice, il miglior modo per affrontare il problema è quello della prevenzione, tramite l'impiego sistematico di cementi di miscela o di loppa, in presenza dei quali la reazione alcali-silice è fortemente ridotta o addirittura eliminata.

Questa strategia, che è una sorta di assicurazione contro i rischi di reazione alcali-silice, e che dovrebbe essere adottata in quelle aree (geografiche) dove maggiore si è rivelato, in termini statistici, il rischio di questo degrado.

Capitolo 1: ASR (ALKALI – SILICA REACTION)

1.1 IL CALCESTRUZZO

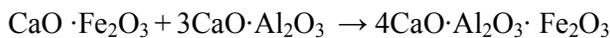
Il calcestruzzo è un conglomerato formato da cemento, acqua e aggregati (ghiaia, pietrisco, sabbia), materiali che opportunamente dosati danno luogo a un prodotto monolitico, duro, meccanicamente resistente e durevole. È il materiale da costruzione attualmente di maggior impiego: ogni anno nel mondo sono prodotti oltre 2000 milioni di m³ di questo materiale dei quali 120 milioni in Italia.^[1] Il suo costo relativamente basso, le sue ottime prestazioni, la larga disponibilità di materie prime in tutto il mondo, la facilità di lavorazione, la buona resistenza alle aggressioni ambientali e all'acqua, sono le ragioni delle innumerevoli applicazioni di questo materiale. Il componente base per la produzione del cemento è il clinker.

Le materie prime per la produzione del clinker sono minerali contenenti: ossido di calcio (CaO), ossido di silicio o silice (SiO₂), ossido di alluminio (Al₂O₃), ossido di ferro (Fe₂O₃) e ossido di magnesio (MgO). L'estrazione del materiale avviene in cave poste nelle vicinanze dei luoghi di produzione. In generale la composizione del minerale è adatta di per sé a produrre il clinker, ma in taluni casi è invece necessario aggiungere altre sostanze quali argilla e calcare. Il clinker di cemento Portland è un materiale idraulico che deve essere composto da almeno due terzi della massa di silicati di calcio: tricalcico -o alite- (3CaO·SiO₂) e bicalcico -o belite- (2CaO·SiO₂). La parte rimanente contiene ossido di alluminio (Al₂O₃) principalmente sottoforma di alluminato tricalcico -o celite- (3CaO·Al₂O₃), ossido di ferro (Fe₂O₃) principalmente sottoforma di ferrito alluminato tetracalcico (4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃) e altri ossidi.^[2]

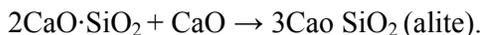
I quattro costituenti principali del clinker in letteratura sono indicati rispettivamente con i nomi: alite, belite, celite e fase ferrica. Se analizziamo il processo di produzione, quindi cosa succede all'interno del forno di cottura, si ha che le prime reazioni hanno inizio in un range di temperatura tra i:

- 1000 ÷ 1100 °C:
 $3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (celite)
 $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (belite)
 $\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

- 1100 ÷ 1200 °C:



- 1250 ÷ 1480 °C:



L'acqua è uno dei tre elementi indispensabili, insieme al cemento e all'aggregato lapideo, nel processo produttivo del calcestruzzo; il suo dosaggio e la sua composizione sono determinanti per assicurare le prestazioni richieste ai getti. L'acqua interviene con le sue proprietà in tutti gli stadi della vita del conglomerato: assicura l'idratazione al cemento, conferisce al calcestruzzo fresco una lavorabilità e plasticità tale da consentirne la messa in opera. La quantità di acqua utilizzata nell'impasto determina il rapporto acqua/cemento. Relativamente alle acque per il confezionamento del calcestruzzo, la norma UNI EN 1008 consente di impiegare sia acque potabili che acque di riciclo dell'industria del calcestruzzo, quelle provenienti da pozzi artesiani, quelle superficiali e quelle reflue di origine industriale, con la sola esclusione delle acque nere. La composizione dell'acqua è molto importante: le sostanze che si trovano in sospensione ed i sali disciolti intervengono nella cinetica dell'idratazione del cemento e nella reologia del calcestruzzo fresco. Solfati, cloruri e bicarbonato sono tra i sali disciolti nell'acqua quelli che esercitano una certa influenza sul calcestruzzo. I solfati, se contenuti nell'acqua d'impasto, non sono eccessivamente dannosi, mentre sono agenti aggressivi se l'acqua che li contiene bagna il calcestruzzo indurito. ^[1]

| SOSTANZE | CONTENUTO MAX AMMISSIBILE (mg/L) |
|----------|-----------------------------------|
| Cloruri | 1000 |
| Solfati | 2000 |
| Alcali | 1500 |
| Zuccheri | 100 |
| Fosfati | 100 |
| Nitrati | 500 |

| | |
|--------|-----|
| Piombo | 100 |
| Zinco | 100 |

Tab. 1.1.1 : Valori massimi consentiti di alcune sostanze nelle acque destinate al confezionamento del calcestruzzo.

Gli ultimi componenti per il confezionamento del calcestruzzo sono gli aggregati. Essi sono sostanze minerali naturali e/o artificiali, frantumate e/o non frantumate con particelle di dimensioni e forme adatte alla produzione di calcestruzzo. Esistono diversi motivi per giustificare l'aggiunta degli aggregati alla pasta di cemento. Il principale motivo economico è il costo dell'aggregato molto inferiore al costo del cemento. La più importante funzione tecnologica riguarda il ritiro della pasta di cemento che con l'aggiunta dell'aggregato viene diminuito proporzionalmente. La presenza degli aggregati nel calcestruzzo influisce positivamente sulla durabilità che viene migliorata sostituendo una parte della pasta cementizia, con un materiale più durevole qual è l'aggregato. Molte proprietà del calcestruzzo indurito dipendono dalla percentuale dell'aggregato e possono migliorare aggiungendo nell'impasto un'adeguata quantità di aggregato. Gli aggregati occupano una percentuale in volume del calcestruzzo molto elevata (65 – 80%)^[1]. Questi si suddividono principalmente in:

- Naturali;
- Riciclati.

Gli aggregati naturali, estratti dalle cave, possono derivare da rocce eruttive (graniti), sedimentarie (calcari), metamorfiche (quarziti).

Tra gli aggregati riciclati ricordiamo:

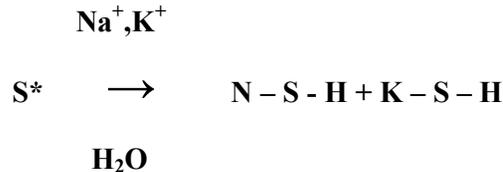
- C&DW che comprendono tutti gli scarti che derivano dalle diverse attività di costruzione, demolizione di edifici, opere civili;
- EAF Slag, scorie provenienti dalla lavorazione dell'acciaio;
- MSWI Bottom Ash, ceneri provenienti dai termovalorizzatori usati per produrre energia termica dalla combustione dei rifiuti solidi urbani (RSU).

1.2 ASR (ALKALI – SILICA REACTION)

La reazione Alkali – Silice (ASR, Alkali – Silica Reaction) è la principale causa dei fenomeni espansivi a carattere distruttivo per il calcestruzzo. La reazione ASR è stata scoperta alla fine degli anni '30, ma esplicitata solo nel 1940 da T.E. Stanton, che per primo l'ha descritta come reazione tra il cemento e gli aggregati nel calcestruzzo. È ormai noto che la reazione avviene a causa dell'elevato pH della soluzione nei pori del calcestruzzo.^[3]

Questa soluzione aggressiva attacca i minerali silicei presenti negli aggregati grossi e fini.

La reazione alcali – silice coinvolge sostanzialmente gli aggregati che contengono una particolare forma di silice, capace di reagire con gli alcali (sodio e potassio), provenienti dal cemento o dall'ambiente esterno, per produrre una reazione espansiva. Ogni granulo di aggregato reattivo dotato cioè di silice mal cristallizzata o amorfa, si rigonfia quando viene a contatto con acqua e alcali (Na e K):



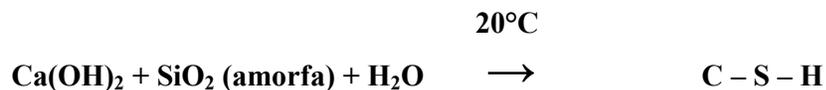
S* rappresenta una silice mal cristallizzata o amorfa, e proprio per questo, dotata di una capacità di reagire con gli alcali del cemento in presenza di acqua per produrre silicati di sodio, N-S-H, e potassio idrati, K-S-H, il cui reticolo cristallino ha un volume elevato. La reazione tra gli alcali e gli aggregati silicei reattivi produce un gel di silicato che può principalmente assorbire acqua, e quindi rigonfiare. Questo rigonfiamento può provocare uno stato fessurativo fortemente influenzato dalla presenza di vincoli (geometria della struttura, disposizione delle armature) e dal livello degli stati tensionali esistenti. Quando queste forze espansive superano la resistenza a trazione del calcestruzzo può verificarsi la rottura (cracking). Il panorama fessurativo tipico è quello detto “a ragnatela” con fessure distribuite casualmente dalle quali può fuoriuscire il gel biancastro. (Fig.1.1)



Fig. 1.1: Panorama fessurativo reazione ASR

Altro fenomeno tipico è il pop-out, cioè l'espulsione di piccole porzioni di calcestruzzo di forma tronco-conica. Nella tecnologia del calcestruzzo lo stato amorfo o cristallino di un determinato prodotto gioca un ruolo di grande importanza nella reattività verso altri prodotti. Esistono due esempi, uno in positivo e l'altro in negativo dal punto di vista pratico, sulla diversa reattività della silice cristallina ed amorfa.

Il primo esempio (positivo) riguarda la reattività della pozzolana nei confronti della calce, Ca(OH)_2 , a temperatura ambiente:



Dove C-S-H rappresenta genericamente i calcio-silicati-idrati di natura prevalentemente fibrosa, prodotti capaci di migliorare significativamente le prestazioni meccaniche della calce e anche del cemento Portland. Il secondo esempio (negativo) sulla diversa reattività di un prodotto amorfo rispetto al corrispondente prodotto cristallino di pari composizione chimica, riguarda la silice (presente negli aggregati lapidei) nei confronti degli ioni alcalini (sodio Na^+ e potassio K^+) presenti nella fase acquosa. La reazione alcali - silice (ASR) è in relazione con la reattività della silice amorfa, presente in alcune rocce silicee (aggregati reattivi), nei confronti degli ioni Na^+ o K^+ presenti nel cemento o provenienti dall'ambiente.

Essa può essere così schematicamente rappresentata:



N(K)-S-H indica genericamente un silicato idrato di sodio e/o potassio che si forma a temperatura ambiente ed è accompagnato da un indesiderato fenomeno espansivo (localizzato intorno agli aggregati reattivi) responsabile di gravi e diffusi deterioramenti delle strutture in servizio. In questo caso, con l'impiego di aggregati silicei di pari composizione, il processo fortunatamente non avviene nelle condizioni di servizio o avviene solo in condizioni limite, per esempio a temperature elevate ed eccessive concentrazioni degli ioni alcalini.

Il degrado del calcestruzzo dovuto alla presenza di silice reattiva dipende dal concorso di più cause:

- La presenza di silice reattiva in un inerte, a differenza della presenza di cloruro o solfato rilevabile con una semplice e rapida analisi chimica, può essere accertata con molta difficoltà e tempi lunghi.
- La silice reattiva è distribuita in forma discreta: ciò comporta il rischio di non evidenziare la sua presenza se il campione di inerte sotto esame non contiene alcun granulo di silice reattiva e di considerare quindi accettabile un inerte che invece dovrebbe essere scartato.
- La reazione alcali – silice dipende dal contenuto di alcali nel calcestruzzo.
 - La reazione alcali – silice può decorrere solo in presenza di umidità e si verifica, quindi, più frequentemente in ambienti esterni, ma anche in ambienti chiusi ed esposti alla risalita capillare di acqua dal terreno.
 - La reazione ASR è in generale molto lenta ed è accelerata dalle temperature più elevate; tuttavia, a seconda delle circostanze (grado di reattività della silice, umidità e temperatura ambientale, contenuto alcali) il fenomeno può richiedere da qualche mese ad una decina di anni per potersi manifestare.

La prevenzione del fenomeno di ASR può avvenire attraverso una delle seguenti strategie:

- Non impiegare aggregati alcali – reattivi;
- Non impiegare cementi ricchi in alcali;

- Mantenere asciutta la struttura in calcestruzzo;
- Impiegare cementi pozzolanici, d'altoforno o compositi.

L'ultima soluzione consiste, nel distribuire all'interno del calcestruzzo una miriade di particelle a base amorfa (come la pozzolana) o vetrosa (come la loppa) o di entrambi (nei cementi compositi) potenzialmente capaci di reagire con gli alcali proprio come la silice amorfa o mal cristallizzata dagli aggregati alcali – reattivi. Tuttavia, la ripartizione dell'ASR su un numero elevatissimo di particelle di pozzolana e/o loppa distribuite omogeneamente in tutto il calcestruzzo attenua fortemente quel carattere distruttivo dell'espansione che si registra localmente in corrispondenza dei pochi granuli di aggregato reattivo. Dunque gli alcali, anziché concentrare la loro aggressione su pochi granuli di aggregato alcali – reattivo, distribuiscono la loro azione su tante particelle finissime di pozzolana e/o loppa facendo perdere il carattere espansivo localizzato in pochi punti. Alcune forme di silice presenti negli elementi lapidei non sono stabili in presenza di alcali (sodio e potassio) e possono dar luogo ad espansioni distruttive nei manufatti. Gli alcali sono sempre presenti nel calcestruzzo in quanto contenuti nei cementi; essi, inoltre, possono pervenire per diffusione dall'ambiente esterno (acqua di mare ricca in cloruro di sodio e sali disgelanti a base di cloruro di sodio). Pertanto, l'impiego di aggregati contenenti queste sostanze indesiderabili espongono il calcestruzzo ad un forte rischio di dissesto.

Le principali forme mineralogiche alcali-reattive sono costituite prevalentemente da silice, sia di natura cristallina che criptocristallina (strutture cioè in cui i vari componenti si presentano in individui cristallini con dimensioni così esigue da non essere risolvibili al microscopio ottico ma sono rilevabili solo mediante diffrazione ai raggi X), o da silice idrata a struttura prevalentemente amorfa presenti in diversi tipi di rocce. La formazione del gel alcalino conseguente al fenomeno è capace di promuovere la fessurazione e, successivamente, l'espulsione di parti consistenti di conglomerato cementizio. Il quadro fessurativo tipico della reazione alcali-aggregato è costituito da soluzioni di continuità ad andamento irregolare che non seguono il disegno dei ferri di armatura. L'ampiezza delle lesioni, inoltre, può risultare anche dell'ordine di qualche millimetro. La reazione alcali-silice risulta molto pericolosa perché si può manifestare dopo qualche mese o anche dopo qualche anno (in funzione della concentrazione di alcali, della natura e della percentuale di silice presente negli

aggregati e del grado di saturazione del calcestruzzo) dal getto del calcestruzzo e, quindi, quando risulta difficile qualsiasi intervento di ripristino per bloccare il fenomeno espansivo, essendo la struttura già in servizio. Per questo motivo la norma UNI 8520/2 impone che gli aggregati per calcestruzzo vengano sottoposti prima del loro impiego ad un esame petrografico da condursi in accordo alla norma UNI-EN 932-3, per accertare la presenza di minerali alcali reattivi. Nella eventualità che venga rilevata la presenza di una delle forme silicee pericolose, tuttavia, prima di scartare l'aggregato si procede ad effettuare una prova di espansione accelerata su prismi di malta confezionati con l'aggregato in esame e con un cemento volutamente ricco in alcali ($\text{Na}_2\text{O} > 1\%$), mantenuti in una soluzione di idrossido di sodio (1N) alla temperatura di 80°C : trascorsi 16 giorni, l'espansione deve risultare al massimo pari allo 0.1%. In presenza di espansioni superiori a quella massima prevista nella prova accelerata, l'aggregato ancora non è da ritenersi inidoneo^[4]. Il deterioramento per attacco solfatico può manifestarsi allorquando nel confezionamento del calcestruzzo vengano impiegati aggregati inquinati da solfati in forma di gesso o anidrite. Le reazioni degradanti sono le stesse di quelle promosse dal solfato proveniente dall'ambiente esterno e i fenomeni di dissesto si manifestano in forma di fessurazioni, espansioni ed espulsioni di porzioni consistenti di struttura, come si nota dalla fig 1.2.



Fig. 1.2: degrado dovuto reazione ASR

Per questo motivo è indispensabile sottoporre gli aggregati destinati al confezionamento del calcestruzzo ad un preventivo esame teso ad accertare

l'assenza di minerali solfatici potenzialmente pericolosi. La norma UNI 8520/2 suggerisce, a tale scopo, di effettuare un preliminare esame petrografico e, qualora venisse accertata la presenza di gesso o anidrite, di determinare il contenuto di solfati solubili in acido. Oltre ai solfati, gli aggregati possono essere inquinati da composti che contengono zolfo i quali, ossidandosi, potrebbero dar luogo a fenomeni espansivi in forma di *pop-out* simili a quelli determinati dalla reazione alcali-aggregato; per questo motivo la norma UNI 8520/2 impone un limite al contenuto di zolfo.

Le tabelle seguenti riportano la composizione chimica delle EAF Slag e delle MSWI Bottom Ash, confrontate con quella di un inerte di natura lapidea tradizionale^[5].

Le scorie EAF (Electric Air Furnace) spesso vengono utilizzate, oltre che come aggregati nella produzione di calcestruzzi, anche per la costruzione del sottofondo stradale, come si può vedere dalla fig1.3.



Fig. 1.3: EAF Slag usata per costruzione sottofondo stradale

È fondamentale sottolineare come la presenza maggiore di silice di una scoria, rispetto all'altra possa provocare un aumento esponenziale della probabilità che si verifichi una ASR.

| Composizione chimica | EAF SLAG (%) | MSWI B.A. (%) | INERTE CALCAREO (%) |
|-----------------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|
| SiO ₂ | 15.3 | 53.41 | 0.01 |

| | | | |
|--------------------------------|------|-------|-------|
| CaO | 23.9 | 13.25 | 54.97 |
| Al ₂ O ₃ | 7.4 | 10.29 | 0.17 |
| MgO | 5.1 | 2.02 | 0.64 |
| MnO ₂ | 4.5 | 0.06 | - |
| SO ₃ | 0.1 | 1.21 | - |
| Na ₂ O | 1.0 | 2.46 | - |
| K ₂ O | 1.0 | 0.71 | - |
| TiO ₂ | 1.0 | 0.38 | - |

Tab. 1.2.1: Confronto composizione chimica fra EAF, MSWI e un inerte naturale.

Come possiamo notare dalla tabella, per quanto riguarda il contenuto di Silice, e quindi la conseguente probabilità di affermazione di una reazione alcali – silice, nelle scorie MSWI B.A. è molto più elevato rispetto alle scorie EAF.

I metodi di laboratorio attuali per la determinazione della reazione ASR sono basati sulla valutazione empirica. In seguito è descritto un particolare tipo di test su diversi tipi di cementi con vari metodi di prova effettuati ad Austin (TX) dall'Università del Texas^[3]. Questi test hanno fornito e forniranno dati di analisi comparativa cruciali per sviluppare in futuro metodi di prova in laboratorio più adeguati. La tabella 1.2.3 mostra le analisi di ossido nei diversi cementi; il cemento 1 (CEM1) è stato usato per tutti i test e in particolare la maggior parte dei provini sono stati esposti all'aria aperta. Uno dei test utilizzati per la determinazione la soglia di alcali è l'immersione di provini in acqua alla temperatura di 23°C per 24 h. In seguito tali provini sono stati immersi in soluzione salina di idrossido di sodio alla temperatura di 80°C per 14 giorni. Questi test vanno a constatare l'aumento di lunghezza dei provini, che dopo l'immersione in soluzione, aumenta di circa 0.002mm.

Per accelerare le risposte del test i provini vengono messi all'aria aperta, e si è notato che maturano un cambiamento nella lunghezza di circa 0.00127 mm.

Successivamente è stato usato un altro tipo di cemento (CEM2), di caratteristiche generali simili al Portland, e un ulteriore tipo di cemento (CEM4) è stato comparato agli altri due per determinare la soglia di alcali necessaria per

indurre un espansione di un aggregato reattivo (F1). L'ampia portata di questo progetto ha richiesto la disponibilità di una grande varietà di aggregati. Si è partiti con la valutazione di 12 aggregati provenienti dal Texas, 2 provenienti da Canada, e 3 da altre località degli Stati Uniti. Successivamente 11 aggregati supplementari sono stati prelevati da tutti gli Stati Uniti. Questa ampia varietà disponibile ha permesso la riuscita di quest'esperimento. La denominazione "F" e "C" viene utilizzata per indicare rispettivamente aggregati fini e grossolani.

| Composizione chimica | CEM1 | CEM2 | CEM4 |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| SiO ₂ | 19.8 | 20.14 | 20.86 |
| CaO | 61.6 | 57.31 | 65.38 |
| Al ₂ O ₃ | 5.5 | 4.67 | 5.01 |
| MgO | 2.6 | 1.57 | 1.41 |
| SO ₃ | 4.2 | 2.68 | 2.87 |
| Na ₂ O | 0.95 | 0.72 | 0.52 |
| Fe ₂ O ₃ | 2 | 2.36 | 1.81 |

Tab. 1.2.3: Composizione chimica cementi

Come si è detto in precedenza riguardo i provini, per determinare dati utili relativi al fenomeno dell'ASR è stato costruito un sito di esposizione esterna. Esso è stato costruito nel 2000, presso l'Università del Texas ad Austin occupa una superficie di 15x30 m, e per facilitare il drenaggio dell'acqua è stato riempito di roccia calcarea frantumata. La figura 1.4 mostra una foto del sito di Austin in Texas.



Fig. 1.4: Sito di Austin (Texas)

Le misurazioni sui blocchi in esposizione all'esterno sono effettuate solo in determinate condizioni climatiche. La temperatura ambientale deve essere compresa tra i 20 / 23°C e cielo nuvoloso in modo da non impartire effetti termici di luce o umidità ai blocchi stessi. A causa delle temperature estive del Texas molto elevate nei vari periodi dell'anno sono state fatte molte misurazioni per tener conto degli effetti di dilatazione termica del materiale. Per le misurazioni delle espansioni dovute all'ASR, di norma, si usano due comparatori digitali di diversa lunghezza. Nel caso di calcestruzzo non armato, questo esperimento ha evidenziato, grazie all'utilizzo di comparatori digitali molto precisi, come in genere la crepa di iniziazione a causa dell'ASR si verifici a circa 0.04% di espansione. Anche se questo non rappresenta un criterio formale per classificare un aggregato reattivo, è stato osservato che la rottura dei blocchi si verifica quando, su almeno una delle facce, si raggiunge il valore di 0.04. Condizioni di esposizione, umidità, luce, su ciascuna faccia portano differenti caratteristiche di espansione. Di conseguenza è stato necessario effettuare una raccolta dati sui blocchi stessi nei vari periodi. È necessario constatare, però, che la maggior parte dei danni da ASR non è evidente nei primi anni dopo la creazione del provino, salvo nel caso di aggregati altamente reattivi e condizioni climatiche aggressive. Si è infatti osservato che generalmente affinché venga osservato un danno da reazione alcali – silice possono passare addirittura 5 anni. Pertanto, il monitoraggio di questo sito di esposizione continuerà a determinare prestazioni sul campo di molti aggregati reattivi e fornire la necessaria informazione per lo sviluppo di migliori tecniche di analisi di laboratorio.

1.3 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Paolo Colombo, Dina Festa, “ *MATERIALI per l’Ingegneria Civile*”, Edizioni Libreria Progetto, PADOVA 2008.

[2] <http://www.wikipedia.org/wiki/clinker>

[3] Jason H. Ideker, Anthony F. Bentivegna, Kevin J. Folliard, and Maria C. G. Juenger, “*Do Current Laboratory Test Methods Accurately Predict Alkali-Silica Reactivity?*”, ACI MATERIALS JOURNAL

[4] BBC Betonrossi Basic Concrete a cura di Luigi Coppola e del Servizio Tecnologico di Betonrossi S.p.A.

[5] J.M.Manso, J.A.Polanco, M.Losañez, J.J.González, “*Durability of concrete made with EAF slag as aggregate*”, Cement & Concrete Composites, 30 March 2006.

Capitolo 2: AGGREGATI RICICLATI

2.1 EAFs (ELECTRIC ARC FURNACE SLAG)

Il settore siderurgico rappresenta un'attività che potenzialmente è in grado di esercitare una notevole pressione sull'ambiente a causa delle quantità di materiali coinvolti o della loro natura. Nell'Unione Europea sono state prodotte circa 183 milioni di tonnellate di acciaio^[1]. Più della metà della massa utilizzata nel processo produttivo va a costituire emissioni gassose, rifiuti solidi o altri sottoprodotti. Ogni industria che abbia come obiettivo il raggiungimento della sostenibilità ambientale deve superare alcuni ostacoli, tra cui l'aumento dell'efficienza energetica e l'eliminazione dei rifiuti. Come è noto, ogni volta che si produce ghisa o acciaio si ottiene, come sottoprodotto (by – product) un certo quantitativo di scoria. Approssimativamente si ottengono 0.23 tonnellate di scoria d'altoforno per ogni tonnellata di ghisa e 0.1 ÷ 0.2 tonnellate di scoria per tonnellata di acciaio.^[2] L'utilizzo delle scorie in Europa è rappresentato dalla figura seguente (Fig 2.1).

Come si può notare dal diagramma la maggior parte è utilizzata per la costruzione di strade, per arrivare a considerare solo l'1% della produzione come componente nel cemento.

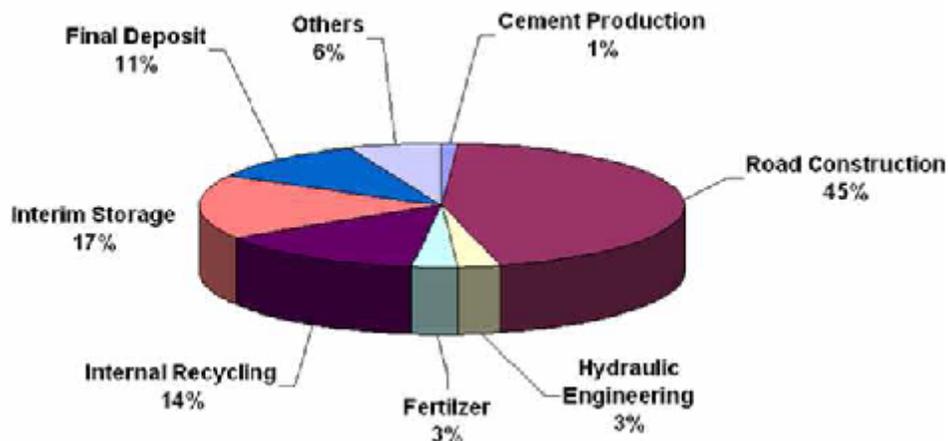


Fig 2.1: Utilizzo Slag in Europa. Fonte: Euroslag, 2006.

Una parte consistente dell'acciaio prodotto in Italia proviene da forni ad arco elettrico (EAF), dai quali ogni anno, insieme all'acciaio, si producono circa 2 milioni di tonnellate di scorie. L'utilizzo diretto di questo sottoprodotto per l'elaborazione di materie prime di qualità raggiunge il doppio scopo di ridurre lo

sfruttamento di risorse naturali limitate e, contemporaneamente, la formazione di potenziali rifiuti. Ancora oggi infatti, nell'Unione Europea, il 60% della scoria da EAF viene destinata allo smaltimento in discarica^[3]. Queste rappresentano la maggior parte di sottoprodotti dell'industria siderurgica, ed è quindi immaginabile l'interesse nell'impiego di questi materiali. La figura 2.2 mostra un esempio di EAF slag.



Fig. 2.2: EAF Slag da usare come aggregato

Sicuramente, grazie al progresso tecnologico, negli anni si è ridotta la produzione unitaria di scoria, anche grazie ad una più accurata scelta della carica degli altoforni. Purtroppo però difficilmente i quantitativi attuali potranno essere ulteriormente ridotti o addirittura annullati. Risulta pertanto doveroso predisporre, mediante validi requisiti operativi e tecnici, procedure volte a prevenire o ridurre il più possibile la quantità di materiale residuale dei processi produttivi. Ciò si può ottenere sia mediante il riutilizzo o il recupero di materiali o sottoprodotti che, se non opportunamente trattati, sarebbero destinati alla discarica, sia controllando le variabili di processo al fine di ottenere prodotti residuali con caratteristiche prefissate. Tutte le scorie vengono viste come sottoprodotti, a cui sono associati gli inevitabili costi di smaltimento. La tendenza attuale è invece quella di valorizzarli conferendo loro un valore aggiunto. Oggi le scorie possono essere utilizzate in diversi campi di applicazione, ad esempio quelle d'altoforno vengono introdotte nel ciclo di produzione del cemento.

Alla metà del XX secolo ci fu un altro cambiamento nella pratica di acciaieria, con l'utilizzo di ossigeno puro per la conversione della ghisa, cioè della tecnologia BOF (Basic Oxygen Furnace), che utilizza la ghisa con un basso tenore di fosforo. Allo stesso tempo si migliorava la produttività dell'altoforno, col risultato di diminuire la quantità specifica di scoria prodotta. Il fattore limitante nell'uso di scorie BOF è la loro insufficiente stabilità volumetrica, ma possiedono buone proprietà meccaniche e compatibilità ambientale.

Negli ultimi anni è aumentata l'importanza del forno elettrico (EAF: Elettric Arc Furnace), che usa il 100% di rottame come materia prima. La scoria da EAF può presentare problemi di instabilità a causa del contenuto relativamente elevato di ossido di magnesio (MgO) che reagisce con l'acqua in maniera analoga alla calce viva (CaO). L'EAF è anche usato per la fusione di acciai alto legati, i quali vengono successivamente trattati nelle postazioni di metallurgia. Diversamente dai prodotti derivanti dalle rocce naturali, l'utilizzo di scorie può consentire il risparmio risorse e minimizzare le emissioni.

Nell'ambito dell'ingegneria civile la normativa ambientale non indica chiaramente quali siano i materiali eco – compatibili e quali no. Si può ritenere che un materiale abbia un basso impatto ambientale se la metodica del suo utilizzo riduce lo sfruttamento di risorse naturali, si pone come alternativa allo smaltimento e non causa un'alterazione negativa dell'ambiente in cui viene inserito o prodotto. Il consumo mondiale di acciaio grezzo è aumentato dal 2006 dell'8.3%, pari a 1.113 milioni di tonnellate.^[4] Per comprendere veramente l'importanza del riutilizzo di scorie derivanti dalla produzione di questo materiale, è fondamentale esporre brevemente il suo ciclo di produzione. La produzione della ghisa e dell'acciaio è normalmente ottenuta per mezzo di una serie di operazioni. Il numero e la natura di queste operazioni sono determinati dal tipo di materia prima e di energia disponibili. Ad ogni stadio, comunque, si produce una certa quantità di scoria che ha il compito di favorire le trasformazioni necessarie ad ottenere il prodotto desiderato. I cicli di produzione dell'acciaio si possono dividere in tre stadi:

- Riduzione dell'ossido in altoforno;
- Processi di acciaieria BOF (Basic Oxygen Furnace) oppure EAF (Elettric Arc Furnace);
- Trattamenti di metallurgia secondaria.

I tipi di scoria prodotta cambiano ad ogni stadio:

- Scoria d'altoforno;
- Scoria da BOF e EAF;
- Scoria da metallurgia secondaria.

La formazione della scoria è il risultato di complesse interazioni fisiche e chimiche tra la carica non metallica (calce), le sorgenti di energia (ossigeno) ed i refrattari. Il presupposto essenziale per la loro utilizzazione è la caratterizzazione delle scorie sia dal punto di vista chimico, così come l'analisi sulla loro compatibilità ambientale. Nei vari paesi del mondo le scorie di acciaieria e d'altoforno vengono utilizzate in maniera diversa: differenze si riscontrano tra un impianto e l'altro in base alla composizione della scoria, tipo di scoria prodotta e utilizzazione dei prodotti della scoria.

Attualmente è di rilevante interesse determinare un utilizzo come aggregato per la scoria derivante dal forno elettrico ad arco, propriamente detta EAF, a causa dell'elevata disponibilità di questo materiale. La fig 2.3 mostra il funzionamento del forno elettrico, mentre in figura 2.4 troviamo una foto di un forno elettrico e le scorie appena rimosse.

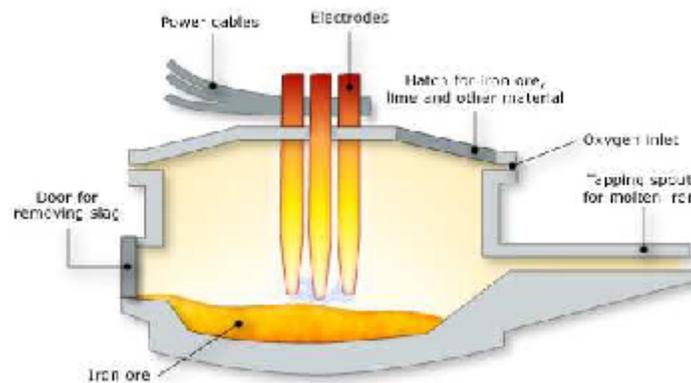


Fig. 2.3: Forno elettrico ad arco



Fig. 2.4: Scorie appena rimosse dal forno elettrico

Il processo di formazione al forno elettrico si divide in 5 fasi (Fig 2.5):

1. **caricamento del rottame:** viene effettuato in più riprese scaricando il rottame nel forno;
2. **fusione del rottame:** la fusione avviene ad opera dell'irraggiamento dell'arco elettrico ad altissima temperatura, circa 2000°C;
3. **ossidazione / decarburazione / surriscaldamento:** si raggiunge il target previsto di carbonio e di temperatura attraverso l'insufflazione di ossigeno gassoso;
4. **riduzione / alligazione:** questa fase, che consiste nell'eliminazione dell'ossigeno in eccesso disciolto nel bagno di acciaio fuso;
5. **spillaggio:** consiste nel travaso dell'acciaio liquido in contenitori.

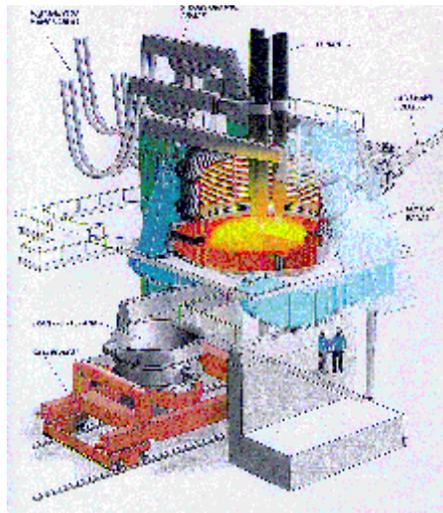


Fig. 2.5: Schema di un forno elettrico ad arco (sopra) e carica (sotto)

La scoria da EAF nasce quindi dal rapido raffreddamento che porta la fase liquida ossidata da circa 1600°C alla temperatura ambiente. La solidificazione in blocchi avviene all'aria o accelerando il processo tramite spruzzi d'acqua; in tal modo può tuttavia rimanere all'interno dei blocchi ancora una certa quantità di calce libera, potenzialmente soggetta a carbonatazione. Queste alterazioni possono essere causa di espansioni disomogenee del materiale, per questo motivo la scoria viene sottoposta ad una adeguata stagionatura durante la quale si realizza naturalmente la stabilizzazione della frazione di ossido di calcio (CaO) e di ossido di magnesio (MgO). Tale procedura prevede la stabilizzazione del materiale una volta frantumato, il quale viene esposto per 90 giorni agli agenti atmosferici e successivamente subisce un ciclo di bagnatura della durata di tre giorni. Secondo la letteratura, onde evitare che si verifichino problemi di rigonfiamento delle scorie, la percentuale di calce libera deve risultare minore del 2%. Attraverso le fasi di stagionatura, di frantumazione e vagliatura la scoria grezza viene trasformata in un prodotto suddiviso in frazioni granulometriche tra cui si distinguono per esempio sabbia (0 – 4mm), graniglia (4 – 8mm) e pietrisco (8 – 12mm). L'intero processo produttivo è strettamente integrato con quello siderurgico e in accordo con la normativa italiana di riferimento (D.Lgs.22/97, DM 471/99).

La composizione chimica della scoria da EAF è riconducibile principalmente ad ossidi di ferro, calcio, alluminio, magnesio, silicio. Il componente principale dal punto di vista quantitativo è sicuramente il ferro. In tabella 2.1.1. possiamo trovare la composizione chimica delle EAFS.^[5]

| EAF SLAG | | | |
|--------------------------------|---------|----------------------------|--------------|
| Componenti % in peso | | Elementi in tracce (mg/Kg) | |
| SiO ₂ | 8 – 18 | As | < 15 |
| CaO | 25 – 35 | Cd | < 30 |
| Al ₂ O ₃ | 3 – 10 | Cr _{total} | 5000 - 22000 |
| MgO | 2 – 9 | Cu | < 300 |
| Fe _{tot} | 20 – 30 | Hg | < 0.5 |
| Mn _{tot} | 2 – 8 | Ni | < 70 |

| | | | |
|------------------------|-----------|----|-------|
| CaO / SiO ₂ | 1.7 – 4.0 | Pb | < 90 |
| | | Zn | < 900 |

Tab. 2.1.1: Composizione chimica EAF Slag.

È possibile inoltre determinare tramite analisi cristallografica ai raggi X, la natura dei materiali presenti all'interno delle scorie da EAF (Fig. 2.6).

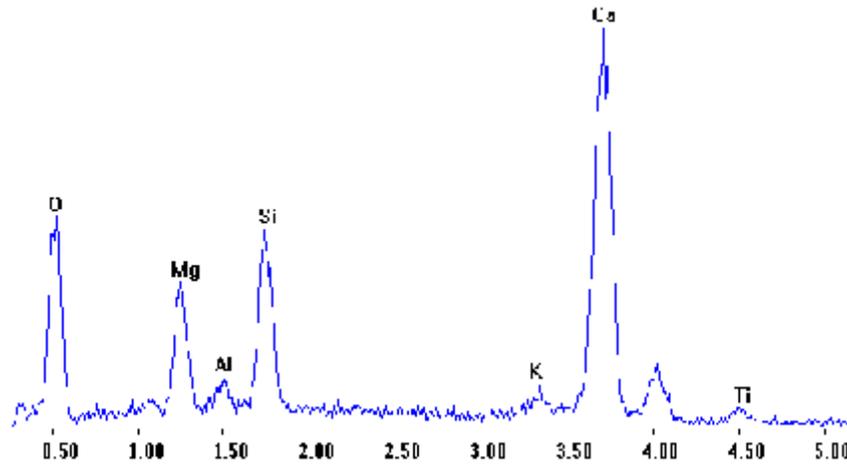


Fig. 2.6: Composizione chimica EAF da raggi X

Si sottolinea che attualmente i lavori presenti in letteratura, volti alla determinazione dell'effettiva fruibilità di questo materiale, sono in fase di evoluzione, e i risultati ottenuti fino ad ora risultano promettenti.



Fig. 2.7: Fase finale lavorazione scorie.

2.2 ALTRE SCORIE DELL'INDUSTRIA SIDERURGICA

Un primo tipo di scoria utilizzata come materia prima per la produzione del cemento è la cosiddetta scoria d'altoforno cristallizzata ABFS (Air cooled Blast Furnace Slag). L'altoforno è l'impianto dedicato a trasformare in ghisa il minerale di ferro.

La scoria si forma quando i minerali di ferro vengono fusi insieme nell'altoforno (Fig 2.8).

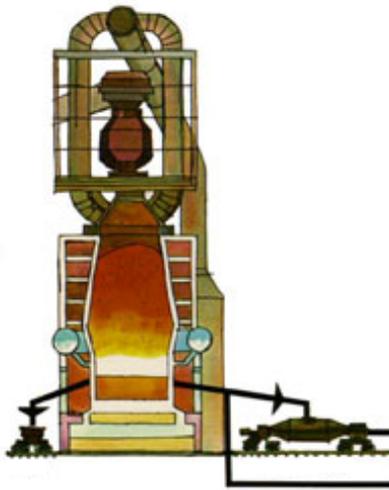


Fig. 2.8: Schema di un altoforno

La scoria cristallizzata ABFS, derivata dal raffreddamento lento in aria, è un materiale di colore grigio. Dopo la solidificazione iniziale, la scoria viene bagnata con getti d'acqua per abbassarne la temperatura e farla indurire, così da farle assumere l'aspetto tipico mostrato in Fig.2.9.



Fig. 2.9: scoria d'altoforno cristallizzata

Il raffreddamento rapido in aria genera invece la scoria d'altoforno granulata GBS (Granulated Blast Furnace Slag), anch'essa usata nella produzione del cemento. Essa viene raffreddata da un getto d'acqua ad alta pressione e la colorazione che essa assume va dal beige al nero. (Fig.2.10) La composizione chimica della scoria d'altoforno è rappresentata in tabella 2.2.1 [5].



Fig. 2.10: scoria d'altoforno granulata.

| SCORIA D'ALTOFORNO | | | |
|--------------------------------|-----------|----------------------------|----------|
| Componenti % in peso | | Elementi in tracce (mg/Kg) | |
| SiO ₂ | 33 – 40 | As | < 1 |
| CaO | 34 – 43 | Cd | < 0.5 |
| Al ₂ O ₃ | 8 – 15 | Cr _{total} | 10 - 100 |
| MgO | 7 – 16 | Cu | < 10 |
| Fe _{tot} | 0.1 – 0.7 | Hg | < 0.1 |
| Mn _{tot} | 0.1 – 0.8 | Ni | < 5 |
| CaO / SiO ₂ | 1.0 – 1.2 | Pb | < 20 |
| | | Zn | < 100 |

Tab. 2.2.1: Composizione chimica scoria d'altoforno

Un altro tipo di scoria utilizzata nei cementifici è la BOF (Basic Oxygen Furnace) (Fig. 2.11). Il convertitore ad ossigeno permette di produrre acciaio da

ghisa proveniente generalmente dall'altoforno. La calce, aggiunta nel convertitore per svolgere la funzione di defosforazione e desolforazione, insieme ai metalli ossidati (C e CO) produce la scoria. La BOF slag è conseguenza dei processi di conversione della ghisa, che in stato liquido viene introdotta nel forno convertitore insieme alla calce (CaO). Viene poi iniettato ossigeno a velocità supersonica che rimuove tutte le impurità, combinandosi con loro. Le impurità sono costituite da carbonio, silicio, manganese e fosforo. La scoria formata viene poi lasciata raffreddare in apposite vasche.

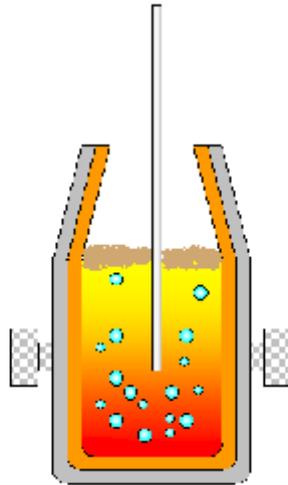


Fig. 2.11: BOF

La scoria da BOF è di colore grigio scuro e molto più dura della scoria d'altoforno. (Fig 2.12) Inoltre essa è soggetta ad una espansione di volume fino a raffreddamento ultimato.



Fig. 2.12: scoria da convertitore di ossigeno

Dal punto di vista della composizione chimica la scoria da convertitore di ossigeno è composta come riporta la tabella 2.2.2. ^[5]

| SCORIA BOF | | | |
|---------------------------------|-----------|----------------------------|-------------|
| Componenti principali % in peso | | Elementi in tracce (mg/Kg) | |
| SiO ₂ | 11 – 18 | As | < 1 |
| CaO | 45 – 54 | Cd | < 1 |
| Al ₂ O ₃ | 1 – 5 | Cr _{total} | 1000 - 3000 |
| MgO | 1 – 6 | Cu | < 50 |
| Fe _{tot} | 14 – 22 | Hg | < 0.5 |
| Mn _{tot} | 1 – 5 | Ni | < 10 |
| CaO / SiO ₂ | 2.8 – 4.4 | Pb | < 10 |
| | | Zn | < 150 |

Tab. 2.2.2: Composizione chimica scoria BOF

La tipologia delle scorie qui descritte viene utilizzata per la produzione di cemento, a causa della loro caratteristica che permette di preservare le proprietà idrauliche tipiche dei prodotti cementizi. Si rimanda dunque alla Tab. 2.2.3, la quale riassume un confronto tra la composizione chimica dei cementi classici con quella di queste aggiunte riciclate.

| Composizione chimica | EAF SLAG (%) | MSWI B.A. (%) | FLY ASH (%) | CEMENTO (%) |
|--------------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| SiO ₂ | 15.3 | 53.41 | 46.51 | 19.3 |
| CaO | 23.9 | 13.25 | 0.67 | 63.56 |
| Al ₂ O ₃ | 7.4 | 10.29 | 25.47 | 5.57 |
| MgO | 5.1 | 2.02 | 15.94 | 0.86 |
| MnO ₂ | 4.5 | 0.06 | - | - |
| SO ₃ | 0.1 | 1.21 | 1.7 | 3.02 |
| Na ₂ O | 1.0 | 2.46 | 0.36 | 0.13 |

| | | | | |
|------------------|-----|------|------|-----|
| K ₂ O | 1.0 | 0.71 | 1.35 | 0.8 |
| TiO ₂ | 1.0 | 0.38 | - | - |

Tab 2.2.3: Confronto fra composizioni chimiche.

2.3 MSWI BOTTOM ASH

Dai termovalorizzatori per produrre energia termica dalla combustione dei rifiuti solidi urbani (RSU) si ricavano due tipi di ceneri: una trascurabile quantità di cenere leggera molto ricca in cloruri e che pertanto non può essere impiegata nella confezione del calcestruzzo armato per il rischio di corrosione dei ferri di armatura; una discreta percentuale (15 – 30 % dei rifiuti trattati) di ceneri pesanti (che non contengono cloruri o altre sostanze nocive per il calcestruzzo) che sono destinate a discarica. Le ceneri pesanti (o, così come spesso vengono chiamate scorie o “bottom ash”), così come si raccolgono nella griglia del termovalorizzatore, sono grossolane e mescolate ad altri frammenti di natura metallica. (Fig. 2.13)

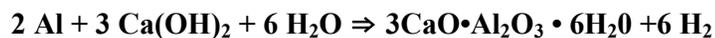


Fig. 2.13: Esempio di MSWI Bottom Ash frantumate.

Se si debbono impiegare come aggiunte minerali nel calcestruzzo, le ceneri pesanti da RSU debbono essere private dai metalli pesanti che sempre accompagnano i rifiuti solidi urbani. Le ceneri pesanti contengono principalmente silice, allumina, calce e ossido ferrico. Ciò significa che, se finemente macinate ,

possono presentare un'attività pozzolanica o un comportamento idraulico con benefici per la microstruttura della matrice cementizia^[6]. Alcuni ricercatori del Politecnico di Milano, come testimoniano in un articolo pubblicato nella rivista "Cement & Concrete Research"^[7], hanno effettivamente determinato che le ceneri pesanti da RSU, purché finemente macinate, reagiscono indurendo in presenza di calce o cemento Portland.

Tuttavia, vi sono poche applicazioni pratiche dell'utilizzo di questo materiale mentre poiché in letteratura sono stati rilevati alcuni problemi connessi con l'impiego di queste ceneri in combinazione con il cemento. Essi si sviluppano conseguentemente all'avvio di una reazione tra le particelle di alluminio metallico presente nelle ceneri da RSU con l'idrossido di calcio che si forma per idratazione dei silicati (C₃S e C₂S) del cemento Portland. A seguito di questa reazione si formano bolle di idrogeno che fanno aumentare la porosità del calcestruzzo indebolendone la resistenza meccanica anche dopo una elevata compattazione:



A causa di questo fenomeno, la cenere pesante, così come proviene dal processo RSU non è adatta per essere utilizzata come aggregato per materiali cementizi, anche se finemente macinata, ed è stata impiegata come aggregato per calcestruzzi bituminosi e attualmente viene smaltita tramite rifusione in cementeria (gli ordini di sostituzione rispetto il volume totale del clinker è dell'ordine del 2%).

Un argomento di grande interesse, quando si parla delle MSWI Bottom Ash, è dunque la reazione dell'alluminio. Sebbene l'incenerimento sia il metodo più efficace per lo smaltimento dei rifiuti, per il raggiungimento di riduzione in massa del 70%, la quantità di residui che rimane da smaltire dopo l'incenerimento è notevole. Più del 90% di residui da incenerimento consiste in ceneri pesanti (bottom ash)^[6]. Al giorno d'oggi gran parte di queste ceneri sono utilizzate per a costruzione di strade, come si vede in Fig. 2.14.



Fig. 2.14: B.A. usate per costruzione di strade.

Questa pratica consente di deviare una significativa parte del volume dalle discariche, con il risultato di conservare gli aggregati naturali. Tuttavia studi condotti dall'Institut National des Sciences appliquées de Lyon (France) hanno permesso di conoscere più a fondo due meccanismi in cui le ceneri pesanti sono coinvolte: il primo riguarda le reazioni chimiche (riguardano principalmente l'Alluminio e lo Zinco) che possono causare un aumento del volume, il secondo tratta la formazione di ettringite. La distribuzione particellare delle Bottom Ash che sono state trattate negli studi variava dai 4 ai 20 mm. La composizione chimica presente nelle MSWI Bottom Ash è rappresentata in tabella 2.3.1^[6].

| Oxides | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O |
|-------------------|------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------------------|
| Amount (%) | 54.6 | 11.1 | 8.0 | 8.5 | 1.5 | 1.3 |

Alcuni test sono stati effettuati in calcestruzzi contenenti sabbie naturali e bottom ash invece di ghiaia per dimostrare la loro interazione con l'alluminio presente negli ossidi. Tutto ciò viene studiato immergendo le bottom ash in acqua distillata con un basso valore di cloro. La macinazione delle B.A. avviene sia in "asciutto" che al "bagnato".

Una volta gettato il calcestruzzo si è verificata un'alta emissione gassosa. Le prime crepe sono apparse dopo 28 giorni e la rottura è sopraggiunta interamente dopo 90 giorni. Questo fenomeno è il risultato della reazione tra l'alluminio presente nelle bottom ash e la portlandite prodotta dall'idratazione del

cemento. In presenza di portlandite , questa reazione può essere descritta nel modo seguente:



Pertanto per ovviare a questa reazione è stato proposto un trattamento a cui sottoporre le bottom ash. Questo consiste nell'immersione delle ceneri pesanti in una soluzione di idrossido di sodio. L'immersione in questa soluzione continua per 15 giorni, successivamente le BA vengono lavate e seccate. Di conseguenza dopo questo trattamento le ceneri pesanti possono rimpiazzare parzialmente (2 – 3%in peso) gli aggregati naturali senza creare problemi di durabilità al calcestruzzo^[8].

Negli ultimi decenni il problema della salvaguardia dell'ambiente è diventato uno dei problemi più rilevanti. I processi industriali generalmente producono grandi quantità di rifiuti che talvolta richiedono procedure di smaltimento e quindi rappresentano un grosso problema ambientale ed economico. In questa situazione risulta, ovviamente, coinvolto anche il settore delle costruzioni civili. I lavori di manutenzione e le demolizioni delle costruzioni esistenti producono grandi quantità di rifiuti, in particolare C&DW. Diventa, pertanto, molto importante riuscire a riutilizzare la maggior quantità possibile di questi "rifiuti", reinserendoli nel ciclo produttivo per la costruzione di nuove opere. Un modo interessante per riciclare i C&DW, nonché i rifiuti provenienti da scarti della produzione industriale di elementi in calcestruzzo precompresso, consiste nel produrre aggregati da utilizzare in parziale sostituzione di quelli "naturali" per la produzione di nuovo calcestruzzo: i cosiddetti RCA dal termine anglosassone " recycled concrete aggregate". La recente letteratura tecnica è ricca di contributi relativi a studi sui calcestruzzi prodotti con materiali riciclati di vario tipo, lavori che tendono a confrontare le performance meccaniche dei cosiddetti "green concrete" con quelle di calcestruzzi tradizionali.

2.4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] www.ilsole24ore.com/art/finanza/l'acciaio_europeo_frena_per_domanda_debole
- [2] Del Fabbro M., Stefanutti M., Ceschia C. (2001) – *Nuovi prodotti derivati dalla lavorazione delle scorie di forni ad arco elettrico: caratteristiche fisico-chimiche e possibili impieghi in campo geotecnico-stradale.* – Quarry & Construction, Agosto 2001.
- [3] AAVV (2000) – *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel* - March 2000.
- [4] <http://www.eurosidescalo.com>
- [5] Information Day on utilisation of blast furnace and steelmaking slag.
- [6] J. Pera , L. Coutaz, J. Ambroise., M. Chababbet , “*Use of incinerator bottom ash in concrete*”, Cement and Concrete Research, 27 (1) (1997) 1-5.
- [7] L.Bertolini, M. Carsana, D. Cassago, A. Quadro Curzio, M. Collepari “*MSWI ashes as mineral additions in concrete*”, CEMENT & CONCRETE RESEARCH, 2 February 2004.
- [8] O. Ginés, J.M. Chimenos, A. Vizcarro, J. Formosa, J.R. Rosell, “*Combined use of MSWI bottom ash and fly ash as aggregate in concrete formulation: Enviromental and mechanical consideration.*” Journal of Hazardous Materials, 7 April 2009.

Capitolo 3: ESEMPI IN LETTERATURA

3.1 USE OF INCINERATOR BOTTOM ASH IN CONCRETE.

In letteratura si possono trovare molti studi riguardo le scorie prodotte dagli inceneritori di rifiuti. Alcuni di questi studi sono stati condotti dall'Institut National des Sciences appliquées di Lione (Francia).

Lo scopo di questi lavori è stato quello di presentare che le MSWI Bottom Ash possono essere buoni aggregati alternativi per la costruzione di calcestruzzi da costruzione, presentando caratteristiche di resistenza a compressione a 28 giorni di 25 MPa.[1]Lo studio si è focalizzato principalmente sugli aggregati passanti al setaccio 4–20mm. La loro bassa densità, alta capacità di assorbire l'acqua, più bassa resistenza rispetto alla ghiaia naturale, hanno consentito di poter considerare questi aggregati di media qualità per il confezionamento del calcestruzzo.(C20-25)

Lo studio si è poi incentrato strettamente sulla reazione che l'alluminio ha nelle MSWI. Infatti, quando questi aggregati di riciclo vengono introdotti nel calcestruzzo, portano i campioni di calcestruzzo ad un rigonfiamento e all'insorgenza di crepe.

Perciò è stato proposto un trattamento di idrossido di sodio per evitare queste degradazioni.

I test di lisciviazione (leaching tests) sono stati eseguiti, in accordo con la normativa francese (NF X31 – 210), su campioni di materiali di diametro <4mm in presenza di acqua de-ionizzata. Dai risultati dei test, considerando l'impatto ambientale, si è scoperto che le MSWI Bottom Ash, non sono molto aggressive nei confronti dell'ambiente.[1]

I risultati dei leaching test si possono riassumere in tabella 3.1.1.

| Substance | Cloruro | Solfato | Alluminio | Cadmio | Cromo | Piombo |
|---------------------------|---------|---------|-----------|--------|-------|--------|
| Content (mg/Kg) | 72.3 | 270.7 | 94.1 | < 0.3 | < 0.6 | < 6 |
| Limiti normativa Francese | - | <15000 | - | < 5 | < 70 | < 50 |

Tab. 3.1.1: risultati dei test di lisciviazione

In tabella 3.1.2 sono elencate le proprietà fisiche delle Bottom Ash e ghiaia naturale.

| Properties | Bottom Ash | Natural gravel |
|---------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Particle size distribution (%) | | |
| 4 – 5mm | 6 | 8 |
| 5 – 8mm | 19 | 42 |
| 8 – 10mm | 15 | 21 |
| 10 – 12.5mm | 21 | 13 |
| 12.5 – 16mm | 22 | 16 |
| 16 – 20mm | 17 | - |
| Density | 2.21 | 2.47 |
| Water absorption (%) | 2.36 | 1.05 |

Tab. 3.1.2: Proprietà fisiche BA e ghiaia naturale.

Due serie di test sono stati effettuati:

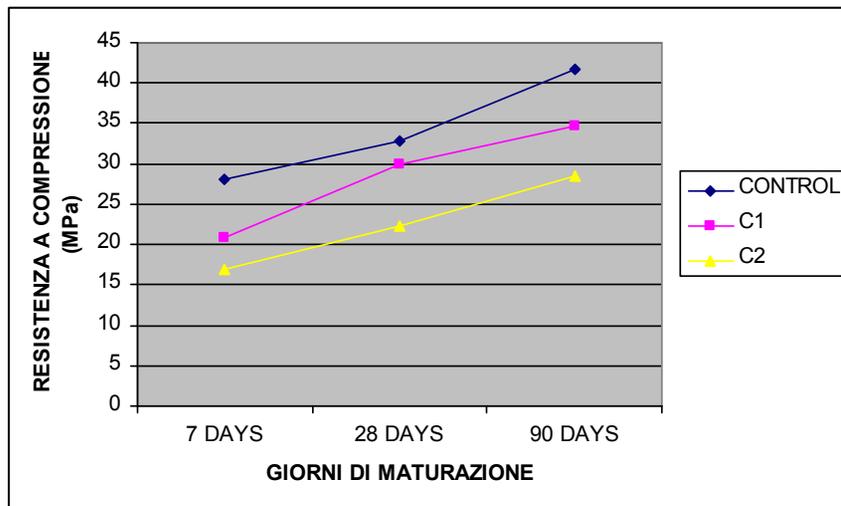
- Nel primo test, il calcestruzzo è stato fatto usando sabbia naturale, 50% di ghiaia naturale e il 50% di B.A. Questo calcestruzzo è stato chiamato C1.
- Nel secondo test, la ghiaia naturale è stata interamente rimpiazzata dalle B.A. Questo, invece, è stato chiamato C2.

La resistenza a compressione e le proporzioni sono riassunte in tabella 3.1.3.

| Type of concrete | | | |
|---|------------|----------|----------|
| | Control | C1 | C2 |
| Mixture proportions (kg/m³) | | | |
| Cement OPC | 290 | 290 | 290 |
| Natural Sand | 930 | 930 | 930 |
| Natural Gravel | 970 | 500 | - |
| Treated bottom ash | - | 420 | 865 |
| Water | 190 | 183 | 183 |
| Slump (mm) | 125 | 145 | 145 |
| Density | 2.27 | 2.26 | 2.19 |
| Compressive strength (MPa) | | | |
| 7 days | 28.0±2.4 | 20.8±1.7 | 17.0±1.7 |
| 28 days | 32.9 ±2.4 | 29.9±1.3 | 22.3±2.0 |
| 90 days | 41.8 ± 2.1 | 34.6±0.8 | 28.4±1.0 |

Tab. 3.1.3

Come possiamo vedere nel grafico seguente, la resistenza a compressione aumenta con l'aumentare del tempo di stagionatura del calcestruzzo.



Il calcestruzzo C1 matura i requisiti per essere considerato un calcestruzzo da costruzione dopo 28 giorni, presentando una resistenza a compressione di 25 MPa.

I risultati di questi test hanno dimostrato come le bottom ash non presentino effetti negativa circa la durabilità del calcestruzzo, qualora tutte le reazioni dovute all'alluminio vengano evitate.

3.1.1 INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

[1] J. Pera , L. Coutaz, J. Ambroise., M. Chababbet , “Use of incinerator bottom ash in concrete”, *Cement and Concrete Research*, 27 (1) (1997) 1-5.

3.2 ESEMPIO EAF SLAG

L'acronimo EAFS, Electric Arc Furnace Slag, sta ad indicare un sottoprodotto recuperato dalle acciaierie dopo il processo d'ossidazione ed è particolarmente utile quando impiegato come aggregato nel calcestruzzo e nelle miscele bituminose.

Calcestruzzi fatti con scorie d'acciaieria come aggregati, presentano buone proprietà sia fisiche che meccaniche e numerosi studi hanno permesso di garantire buona durabilità dal loro utilizzo.

Numerosi test sono effettuati dai laboratori dei dipartimenti di Ingegneria Civile di tutto il mondo per valutare l'espansività interna delle scorie, la reattività chimica con le componenti del cemento e la loro resistenza agli agenti atmosferici come ghiaccio e umidità. In particolare il laboratorio del Dipartimento di Scienze ed Ingegneria dei Materiali del Politecnico di Santander (Spagna) ha condotto un test per valutare il potenziale danno dovuto alla reazione chimica tra idrossidi alcalini e le EAF Slag.

In generale i silicati presenti nelle scorie da EAF sono abbastanza stabili quando sono in contatto con gli alcali, tuttavia la natura chimica e micro strutturale delle componenti delle scorie può presentare una possibile reattività con gli stessi, infatti i test svolti su campioni di calcestruzzo hanno presentato un'espansione dello 0.14% dopo 16 giorni; dopo 28 giorni un'espansione dello

0.15% (valore inferiore allo 0.2% critico) che suggerisce una bassa reattività alcali – EAF.

Un ulteriore test, effettuato su tre campioni in ambiente umido per 28 giorni, riguarda il ciclo di congelamento/scongelo esso si effettua immergendo per 6 ore il campione in acqua a 4°C e mantenendolo per 18 ore in un frigo a meno 17°C. queste condizioni sono sufficientemente severe per evidenziare differenze tra i calcestruzzi, che a 28 giorni presentano una resistenza a compressione di 30/40 MPa.

Alla fine del test si può notare una variazione di peso e di apparenza superficiale: l'interna pressione del ghiaccio, accompagnata dai cambiamenti termici, produce scheggiature sulle facce dei campioni. (Fig 3.1, Fig 3.2)



Fig. 3.1



Fig. 3.2

L'ultimo test condotto sulle scorie da EAF si basa su processi di bagnatura/cottura dei campioni. Esso consiste nell'immersione del provino in acqua potabile per 16 ore e successivamente essiccato in forno a 110°C per 8 ore.

In tabella 3.2.2 è possibile notare la resistenza a compressione dei provini prima e dopo il processo, dove M_i ($i = 1, \dots, 6$) (mixture, tab. 3.2.1) sta ad indicare differenti calcestruzzi composte da miscele di aggregati differenti (si veda la composizione dei calcestruzzi); in generale si nota una perdita minima di resistenza del 40% .

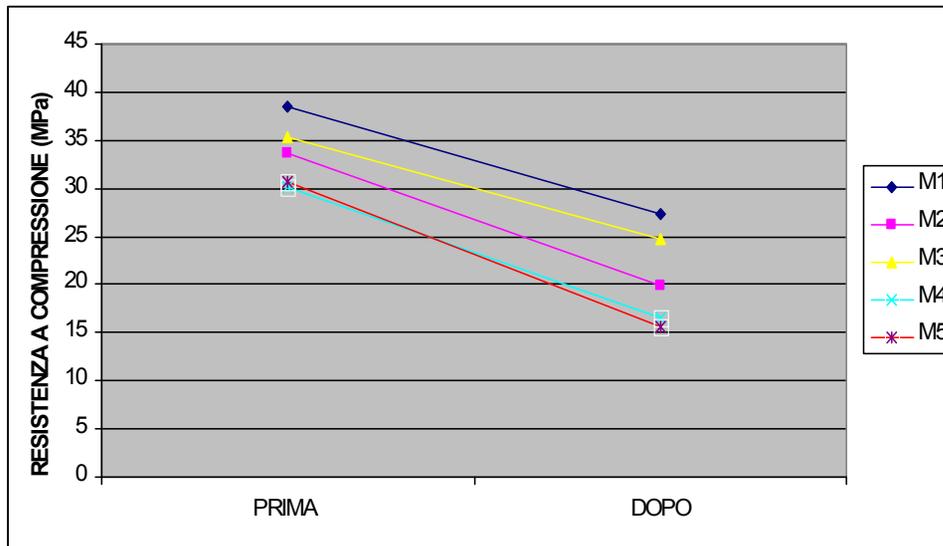
| MIXTURE | Aggregate (0/4 kg) | | aggregate (4/20kg) | | Cement (kg) | Slump test (mm) | Water (kg) |
|---------|--------------------|------|--------------------|------|-------------|-----------------|------------|
| | Limestone | Slag | Limestone | Slag | | | |
| M1 | 930 | - | 935 | - | 310 | 70 | 186 |
| M2 | - | 950 | - | 945 | 310 | Collapse | 186 |
| M3 | 960 | - | - | 895 | 310 | 50 | 186 |
| M4 | 480 | 480 | - | 895 | 310 | 70 | 186 |
| M5 | 480 | 480 | - | 620 | 310 | 120 | 186 |
| M6 | 330 | 630 | - | 620 | 310 | 70 | 186 |

Tab. 3.2.1

| Campioni | Resistenza compressione (MPa) | | Perdita di resistenza (%) | Apparenza superficiale | Variazioni di peso (%) |
|----------|-------------------------------|------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| | prima | dopo | | | |
| M1 | 38.5 | 27.3 | 29 | Buona | -0.08 |
| M2 | 33.7 | 19.9 | 41 | Pochi danni | -0.12 |
| M3 | 35.3 | 24.7 | 30 | Buona | -0.15 |
| M4 | 30.2 | 16.6 | 45 | Pochi danni | -0.16 |
| M5 | 30.7 | 15.6 | 49 | Una crepa | -0.28 |

Tab. 3.2.2

Si può notare nei grafici la variazione della resistenza a compressione prima e dopo il processo.

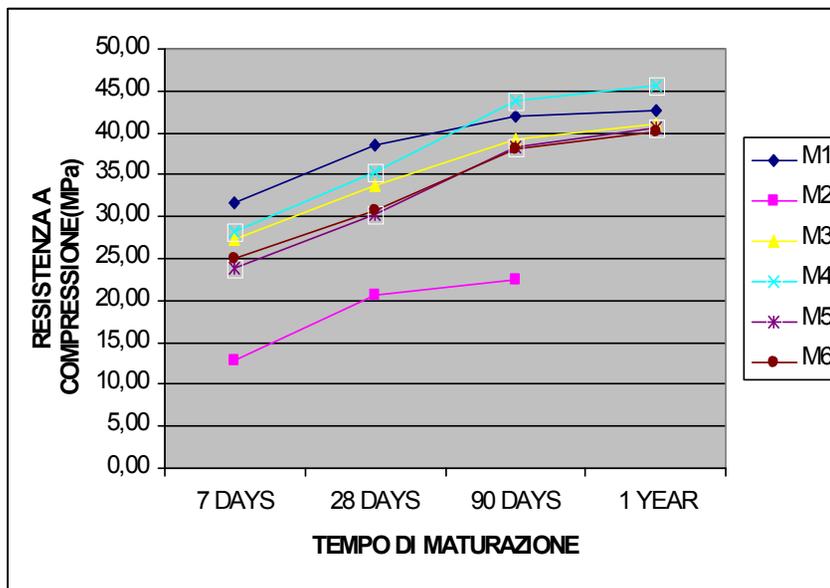


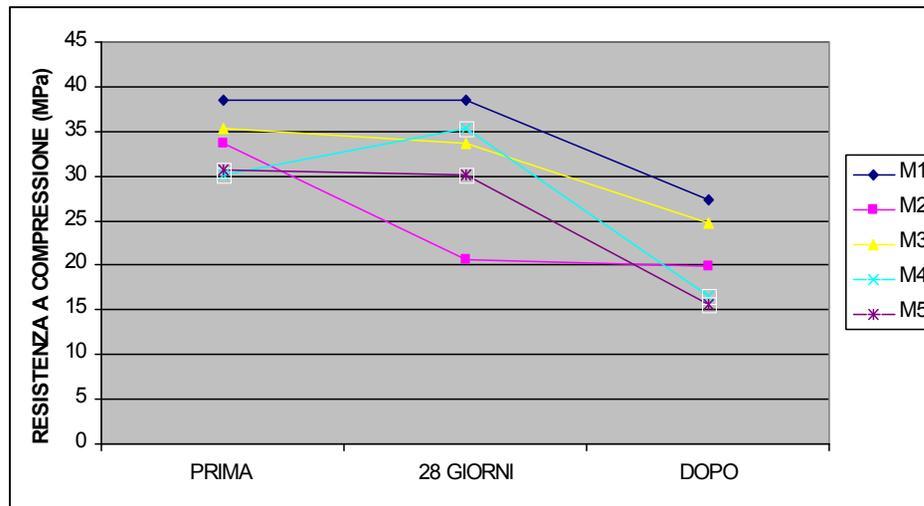
Inoltre partendo da valori di resistenza a compressione riassunti nella Tab. 3.2.3 è possibile determinare l'andamento di tale resistenza prima e dopo il processo.

| Campioni | Resistenza a compressione (MPa) | | | |
|----------|---------------------------------|---------|---------|--------|
| | 7 days | 28 days | 90 days | 1 year |
| M1 | 31.6 | 38.5 | 41.9 | 42.7 |
| M2 | 12.8 | 20.6 | 22.4 | - |
| M3 | 27.4 | 33.7 | 39.2 | 41.1 |
| M4 | 28.1 | 35.3 | 43.8 | 45.6 |
| M5 | 23.8 | 30.2 | 38.3 | 40.5 |
| M6 | 25.1 | 30.7 | 38.1 | 40.2 |

Tab. 3.2.3

I grafici seguenti mostrano rispettivamente l'andamento della resistenza a compressione e la variazione della stessa nel calcestruzzo indurito, cioè a 28 giorni di maturazione.





In conclusione i risultati dei test hanno permesso di constatare che la durabilità del calcestruzzo con EAF Slag è accettabile, sebbene leggermente inferiore al calcestruzzo convenzionale. Quando la proporzione dei componenti è adeguata, la resistenza meccanica del calcestruzzo è soddisfatta. [1]

3.2.1 INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

[1] J.M.Manso, J.A.Polanco, M.Losañez, J.J.González, “Durability of concrete made with EAF slag as aggregate”, *Cement & Concrete Composites*, 30 March 2006.

- C. Pellegrino, V. Gaddo, “Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF Slag as aggregate”, *Cement & Concrete Composites*, 18 May 2009.

Capitolo 4: CONCLUSIONI

Lo studio ha esaminato la possibilità di impiego nella costruzione civile dei prodotti ottenuti dalla lavorazione delle scorie e delle ceneri provenienti dagli inceneritori.

È infatti possibile ottimizzare e integrare le diverse fasi dell'attività produttiva per ridurre la quantità di materiali configurabili come rifiuti e proporre al mercato prodotti competitivi, minimizzando le ripercussioni negative sull'ambiente e sui costi.

Molte delle nuove tecnologie, che sono state individuate sotto la spinta di norme legislative che penalizzano sempre di più gli sprechi e favoriscono il riciclo dei sottoprodotti, si sono rilevate fortemente economiche in quanto, massimizzando la capacità d'uso dei materiali e dell'energia, i maggiori investimenti iniziali sono stati poi ampiamente ripagati dalle rese e dai risparmi energetici.

In Europa e negli altri maggiori continenti c'è una grande richiesta di sottoprodotti e aggregati, principalmente dall'industria dell'ingegneria civile e, in modo particolare, nei campi delle costruzioni in calcestruzzo o delle strade, come pure per fini idraulici (consolidamento degli argini dei fiumi).

Ma ci sono anche altri obiettivi, dichiarati dalla stessa Comunità Europea:

- proteggere l'ambiente e migliorare la qualità;
- preservare la salute dell'uomo;
- garantire la tutela e usare in maniera efficiente le risorse naturali.

Queste dichiarazioni ci rendono responsabili della salvaguardia delle risorse naturali attraverso l'uso dei sottoprodotti industriali, in modo tale da accrescere il loro tasso di riciclo ovunque le proprietà tecniche e ambientali lo rendano applicabile.

In Italia, con il decreto Ronchi del 5/2/1998, si è data la possibilità teorica di riutilizzare le scorie; tuttavia la rispondenza ecologica ed economica nel riciclo dei sottoprodotti non è stata ancora recepita dai principali utilizzatori, che preferiscono ancora impiegare materiali da estrazione per la costruzione di tipo civile.

Nonostante tutto devono e dovranno essere superati alcuni ostacoli che si possono suddividere in tre categorie: normativi, organizzativi, culturali.

Gli ostacoli normativi si sono attenuati col passare del tempo, e i recenti sviluppi danno maggiore importanza al riciclo e alla commercializzazione di inerti riciclati come materiali alternativi a quelli naturali.

Esistono ancora ostacoli di tipo organizzativo, infatti, qualsiasi mercato, per esistere, necessita di infrastrutture fisiche collocate sul territorio finalizzate al riempimento della materia prima.

L'infrastruttura di valorizzazione dei residui deve quindi configurarsi come una rete, con nodi rimari costituiti dagli impianti di selezione e trattamento ma dotata anche di nodi secondari fittamente distribuiti, i punti di raccolta e vendita degli scarti edili riciclabili, oltre che di connessioni efficienti che colleghino questi nodi.

Il livello di informazione sulle potenzialità di utilizzo degli oggetti e dei materiali derivanti dagli scarti da C&D, da EAF, da BOF è ancora estremamente basso. Questa disinformazione, che crea una vera e propria barriera culturale, accomuna quasi tutti gli operatori pubblici e privati. Non vi è la convinzione che gli interventi di C&D e il riuso dei prodotti derivanti possono comportare vantaggi economici. Ad esempio, in Europa, ogni anno, sono prodotte quasi 12 milioni di tonnellate di scorie. E per l'intenso lavoro di ricerca condotto negli ultimi 30 anni, oggi circa il 65% delle scorie d'acciaio prodotte sono riutilizzate su qualificati campi di applicazione.

Il restante 35% di queste scorie, tuttavia, sono ancora totalmente inutilizzabili e destinate alla discarica; sarà necessario un forte lavoro da parte dei ricercatori di tutto il mondo per cercare di diminuire questa percentuale per effettuare un passaggio epocale in sostegno dell'ambiente e del miglioramento della qualità della vita.

È fondamentale tuttavia sottolineare che la qualità di aggregati riciclati contenenti scorie si ottiene esclusivamente mediante un attento controllo del processo di produzione ed un adeguato trattamento.

È necessario conoscere, tuttavia, la presenza di una reazione a carattere espansivo, nota con il nome ASR (Alcali-Silica Reaction) che potrebbe compromettere la durabilità nel tempo del calcestruzzo. Essa coinvolge sostanzialmente gli aggregati che contengono una forma di silice (amorfa o mal cristallizzata), capace di reagire con gli alcali provenienti dal cemento.

La reazione quindi produce un gel silicatico di tipo espansivo di colore giallo-biancastro. Questo rigonfiamento può provocare uno stato fessurativo nel materiale (cracking) oppure addirittura un'espulsione di piccole parti dello stesso (pop-out).

La reazione alcali-silice risulta molto pericolosa poiché può manifestarsi dopo qualche mese o anche qualche anno e pertanto risulta difficile qualsiasi intervento di ripristino per bloccare il fenomeno espansivo. Per questo motivo è indispensabile sottoporre gli aggregati destinati al confezionamento del calcestruzzo ad un preventivo esame teso ad accertare l'assenza di minerali solfatici potenzialmente pericolosi.

Infatti, come si è detto precedentemente nel cap.1, la norma UNI 8520/2 impone che gli aggregati vengano sottoposti prima ad un esame petrografico. Nell'eventualità che venga accertata la presenza di forme silicee pericolose, si attua, prima di scartare il materiale, una prova di espansione consistente nell'immersione dell'aggregato in una soluzione di idrossido di sodio alla temperatura di 80°C per 16 giorni. Trascorsi quest'ultimi si valuta che l'espansione che coinvolge i provini sia in accordo con i limiti della norma sopracitata.

Inoltre, si è visto, come l'attacco solfatico sia anch'esso responsabile di degradazioni sul calcestruzzo maturo. La norma UNI 8520/2, ancora una volta, suggerisce prima un esame petrografico teso ad accertare la presenza il contenuto di solfati solubili in acido. Dalla comparazione tra scorie fatta sempre nel capitolo 1, si è notato come nelle scorie provenienti dalla lavorazione dell'acciaio (EAFs) la presenza di silice (responsabile principale del fenomeno dell'ASR) sia, in quantità, minore rispetto alle polveri provenienti dalla combustione di rifiuti solidi per la produzione di energia elettrica (MSWI B.A.). In calcestruzzi contenenti quest'ultime la reazione ASR è dunque più probabile.

Considerando le MSWI Bottom Ash si è visto come esse siano responsabili dello sviluppo di una reazione tra le particelle di alluminio presenti nel B.A. e l'idrossido di calcio formatosi per idratazione nel cemento. L'aumento della porosità del calcestruzzo, conseguente alla nascita di bolle d'idrogeno generate da questa reazione alluminica, indebolisce la resistenza meccanica del calcestruzzo. Per tale motivo le bottom ash vengono utilizzate in basse percentuali come aggregati nel confezionamento dei calcestruzzi.

Lo studio di questo fenomeno ha permesso la nascita di molti centri di monitoraggio in moltissimi laboratori dei dipartimenti di Ingegneria Civile e dei Materiali di tutto il mondo. Il controllo, infatti, di questi continuerà a determinare prestazioni sul campo su moltissimi aggregati che presentano al loro interno elementi reattivi, e non per ultimo fornire l'approfondita conoscenza del fenomeno per lo sviluppo di migliori tecniche da impiegare nei laboratori.

Bibliografia

LIBRI ED ARTICOLI DA RIVISTE

- M. Collepari, “IL NUOVO CALCESTRUZZO”, Tintoretto, TREVISO, 2001
- AAVV (1999) – *Libro Blanco para la minimization de residuos y emisiones. Escoria de aceria.* - Ihobe, SA. Febrero 1999.
- Del Fabbro M., Stefanutti M., Ceschia C. (2001) – *Nuovi prodotti derivati dalla lavorazione delle scorie di forni ad arco elettrico: caratteristiche fisico-chimiche e possibili impieghi in campo geotecnico-stradale.* – Quarry & Construction, Agosto 2001.
- AAVV (2000) – *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel* - March 2000.
- Paolo Colombo, Dina Festa, “ *MATERIALI per l’Ingegneria Civile*”, Edizioni Libreria Progetto, PADOVA 2008.
- Jason H. Ideker, Anthony F. Bentivegna, Kevin J. Folliard, and Maria C. G. Juenger, “*Do Current Laboratory Test Methods Accurately Predict Alkali-Silica Reactivity?*”, ACI MATERIALS JOURNAL
- J.M.Manso, J.A.Polanco, M.Losañez, J.J.González, “*Durability of concrete made with EAF slag as aggregate*”, Cement & Concrete Composites, 30 March 2006.
- O. Ginés, J.M. Chimenos, A. Vizcarro, J. Formosa, J.R. Rosell, “*Combined use of MSWI bottom ash and fly ash as aggregate in*

concrete formulation: Enviromental and mechanical consideration.”
Journal of Hazardous Materials, 7 April 2009.

- J. Pera , L. Coutaz, J. Ambroise., M. Chababbet , “*Use of incinerator bottom ash in concrete*”, Cement and Concrete Research, 27 (1) (1997) 1-5.
- R. Kikuchi, “*Recycling of MSW for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker*”, Resources, Conservation and Recycling, 2001, 137-147.
- C. Pellegrino, V. Gaddo, “*Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF Slag as aggregate*”, Cement & Concrete Composites, 18 May 2009.
- X.Feng, M.D.A. Thomas, T.W. Bremer, K.J. Folliard, B. Fournier, “*New observation on the mechanism of lithium nitrate against alkali silica reaction (ASR)*”, Cement and Concrete Research, 15 July 2009.
- J. Xiao, J. Li, C. Zhang, “*Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading*”, Cement & Concrete Research, 23 September 2004.
- A. Katz, “*Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*”, Cement & Concrete Research, 23 October, 2002.
- M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Mari, M. Barra, “*Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process of properties of recycled aggregate concrete*”, Cement & Concrete Research, 7 February 2007.

- L. Bertolini, M. Carsana, D. Cassago, A. Quadrio Curzio, M. Collepari, “*MSWI ashes as mineral additions in concrete*”, Cement & Concrete Research, 2 February 2004.
- Caggiano, C. Faella, C. Lima, E. Martinelli, M. Pepe, R. Realfonzo, “*CALCESTRUZZI CONFEZIONATI CON AGGREGATI RICICLATI E CENERE VOLANTE: RISULTATI DI UNA RECENTE CAMPAGNA SPERIMENTALE*”, Dip. di Ingegneria Civile, Università di Salerno.
- J. Pera, L. Coutaz, J. Ambroise, M. Chababbet, “*Use of incinerator bottom ash in concrete*”, Cement & Concrete Research, 15 November 2006.

CONVEGNI

- Information Day on utilisation of blast furnace and steelmaking slag.

SITOGRAFIA

- <http://www.eurosidescalo.com/>
- <http://www.wikipedia.org/>
- http://www.ilsole24ore.com/art/finanza/l'acciaio_europeo_frena_per_domanda_debole