



Il recupero di metalli dai fanghi dell'industria elettronica e dalle pile



CNR - Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria

S. Ubaldini, C. Abbruzzese

Collaborazioni:

Dipartimento di Chimica, Università La Sapienza (Prof. L. Toro)

Dipartimento di Chimica, Ingegneria Chimica e Materiali, Università degli Studi di L'Aquila (Prof. F. Vegliò)

Dipartimento di Scienze Marine, Università Politecnica delle Marche (Dr.ssa F. Beolchini)

Applicazione di processi idrometallurgici al recupero di Zn e Mn da pile scariche

Scopo delle ricerche

Scopo principale delle ricerche è lo sviluppo di un processo economico ed a basso impatto ambientale per il recupero selettivo di MnO_2 e Zn contenuti nelle pile alcaline.

Principali risultati

I risultati hanno dimostrato la fattibilità tecnica dell'applicazione di tecnologie IDROMETALLURGICHE/ELETTROCHIMICHE nel recupero di Zn e Mn da pile scariche; infatti, è stato ottenuto un recupero pressoché quantitativo del manganese (oltre 97 % MnO_2) e dello zinco contenuti (98,5 % Zn).

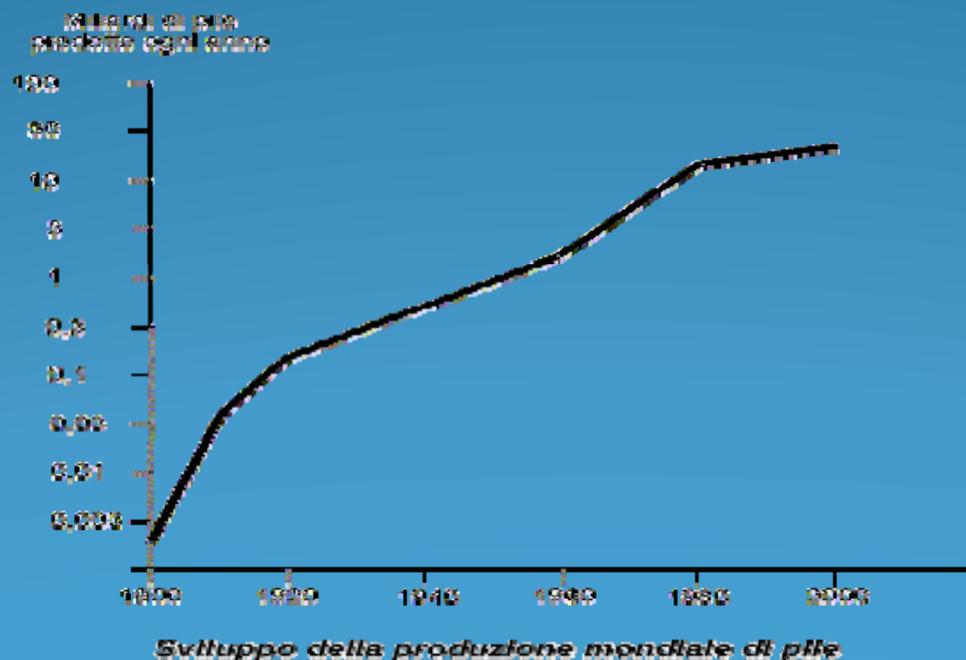
Introduzione

Lo smaltimento delle *pile scariche* costituisce un serio problema a causa del *contenuto in metalli pesanti* e del limitato numero di discariche dotate di adeguate tecnologie per il loro trattamento. Il problema ambientale è strettamente correlato all'evoluzione del mercato delle batterie.

Mercato

Ogni anno, nell'Unione Europea, vengono immesse sul mercato circa 190.000 tonnellate di *accumulatori industriali* e 164.000 di *pile tascabili* (50020 t di pile zinco-carbone e 99000 t di pile alcaline, rispettivamente il 30.5% ed il 60.3% del totale di quelle vendute) – che non contengono piombo, che vanno ad affiancarsi alle circa 800.000 tonnellate di *batterie per auto* (contenenti piombo).

La **produzione delle pile alcaline** si avvicina oggi alla metà dell'intera produzione mondiale. In particolare il mercato annuo delle pile alcaline in Italia ha superato i 170 milioni di unità (quasi la metà di quello totale).



RACCOLTA DIFFERENZIATA

- La **raccolta differenziata** delle pile esaurite è necessaria soprattutto per la **presenza di metalli pesanti**.
- L'**incenerimento** è sconsigliabile, perché una grandissima parte dei metalli contenuti finirebbe nei **fumi** emessi e nell'ambiente. Nel corso degli anni c'è stata una progressiva diminuzione nell'utilizzo dei metalli quali il cadmio, che non è più usato dal 1993, mentre il mercurio è stato ridotto dal 5% allo 0,025%, ed è addirittura scomparso nelle cosiddette pile verdi.
- La **media di raccolta** di questi rifiuti **per abitante** oscilla tra i **60 e i 70 grammi all'anno**, valori molto bassi rispetto ai consumi medi.

NUOVA NORMATIVA

Dal 1° gennaio 2009, in virtù del dlgs. 188/08 (20 Novembre 2008), è obbligatoria anche in Italia la raccolta sistematica e l'avvio al riciclo delle pile e degli accumulatori privi di piombo, ossia quelli che usiamo normalmente per alimentare orologi da polso, giocattoli e piccoli elettrodomestici.

Tale decreto recepisce e rende effettiva la direttiva europea 2006/66/CE (che abroga la direttiva 91/157/CEE).

Ad essere incluse sono: le batterie primarie (cioè pile) di tipo zinco-carbone, alcalino-manganese, litio, zinco-aria, ossido d'argento, le batterie secondarie/ricaricabili (vale a dire accumulatori) al nichel-cadmio, nichel-idruro metallico, ioni e polimeri di litio.

Il nuovo sistema sanzionatorio è stato inasprito e mira a raggiungere fundamentalmente due obiettivi:

- 1) evitare che nel futuro prossimo vengano “immessi sul mercato” pile ed accumulatori che non siano in linea con i principi stabiliti a livello europeo;**
- 2) favorire una nuova cultura avente come obiettivo l'attuazione della “raccolta differenziata” dei rifiuti e la promozione di un “alto livello di riciclaggio”.**

I suddetti obiettivi saranno perseguiti attraverso le seguenti azioni:

- il costante monitoraggio dell'attività dei produttori, anche al fine di evitare l'immissione sul mercato di prodotti che non rispettino l'ambiente; ciò nel pieno rispetto dell'obiettivo primario della direttiva 2006/66, cioè "*ridurre al minimo l'impatto ambientale negativo delle pile e degli accumulatori e dei rifiuti di pile ed accumulatori, contribuendo in tal modo alla salvaguardia, alla tutela ed al miglioramento della qualità dell'ambiente*". Il mancato rispetto delle norme implica pesanti sanzioni amministrative.

Al fine di rendere agevole l'individuazione dei prodotti in linea con tale normativa, **l'articolo 23** prevede che, entro il 26 settembre 2009, le pile e gli accumulatori siano immessi sul mercato solo se contrassegnati in modo visibile, leggibile ed indelebile, con il simbolo del metallo pesante contenuto.

- i distributori sono tenuti formalmente a ritirare gratuitamente pile ed accumulatori esauriti al fine di agevolare una vera e propria *raccolta differenziata*. Anche in questo caso la sanzione per la violazione della normativa è pesante .

- obbligo dei distributori di mettere a disposizione del *consumatore* – presso negozi e centri commerciali - i contenitori per depositare pile ed accumulatori, con l'onere dei produttori di gestire e monitorare il recupero di questi prodotti.

- la costituzione di un nuovo ente: il Centro di Coordinamento Pile ed Accumulatori (CdCPA), istituzione senza fini di lucro fondata il 1° gennaio 2009 con la finalità di rendere agevole la raccolta di pile e accumulatori esauriti e consentire un efficace avviamento di tali materiali di rifiuto verso lo smaltimento.

Principali scadenze programmate:

1. *Settembre 2009*: i produttori di pile dovranno “istituire, su base individuale o collettiva, utilizzando le migliori tecniche disponibili, in termini di tutela della salute e dell’ambiente, sistemi per trattare e riciclare rifiuti di pile ed accumulatori”.
2. *Settembre 2012*: raggiungere un tasso di raccolta del 25% per le batterie che non fanno uso di piombo.
3. *Settembre 2016*: raggiungere un tasso di raccolta del 45% per le batterie che non fanno uso di piombo.

LE PILE ALCALINE

Contenuto medio in biossido di manganese (MnO₂) pari al 35% ed un contenuto in zinco (Zn) pari al 14%.

Sono l'evoluzione delle pile a secco. Sostanzialmente la loro struttura è identica.

Tuttavia le batterie alcaline utilizzano una pasta, alcalina appunto, di **idrossido di potassio** (KOH) come **elettrolita**. Questa innovazione è fondamentale e fa sì che non venga prodotto gas durante il funzionamento e di non avere cadute di tensione. La differenza di potenziale ai poli è di 1,5 V.

Reazione chimica all'**anodo** (ossidazione)



Reazione chimica al **catodo** (riduzione)



Reazione completa

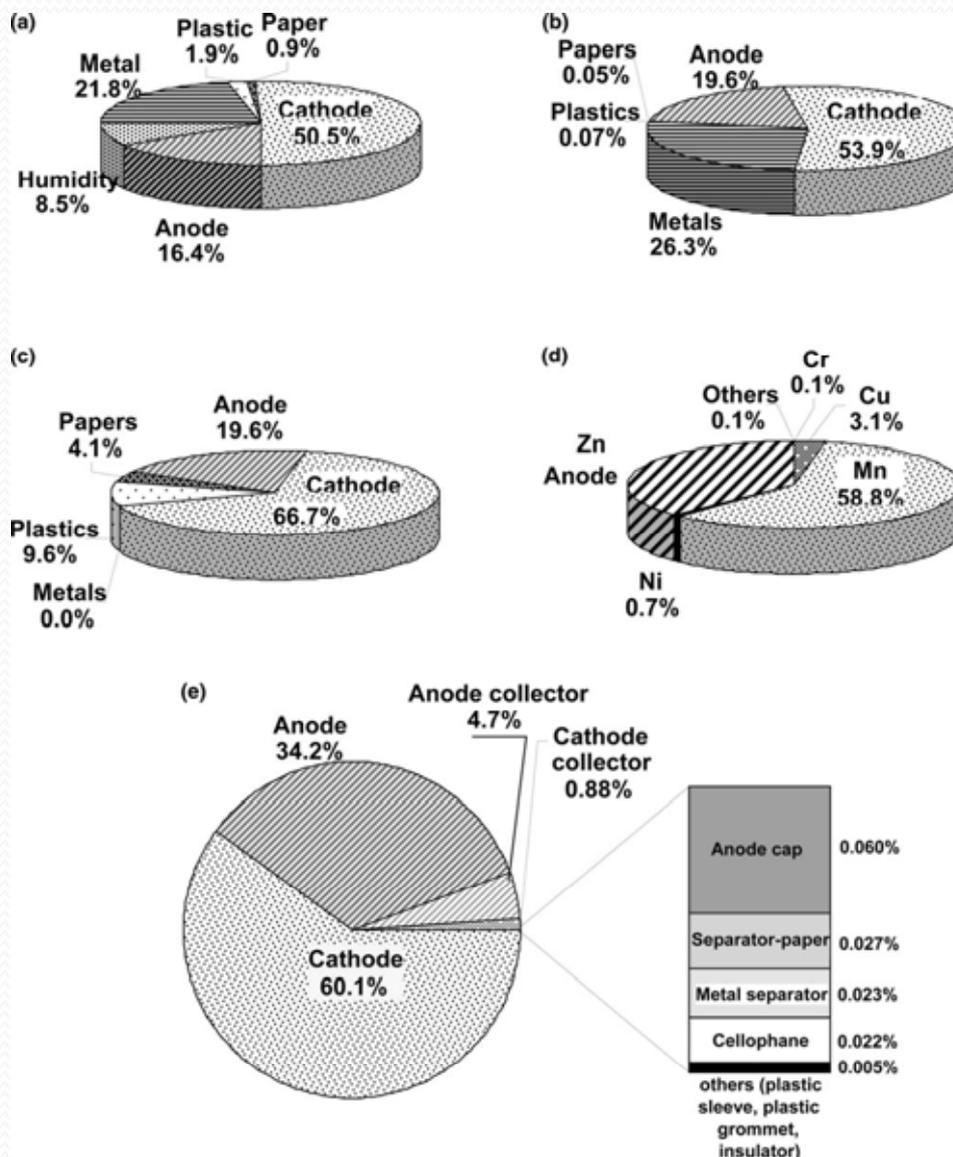


Usi: torce elettriche, giocattoli, strumenti elettronici vari.

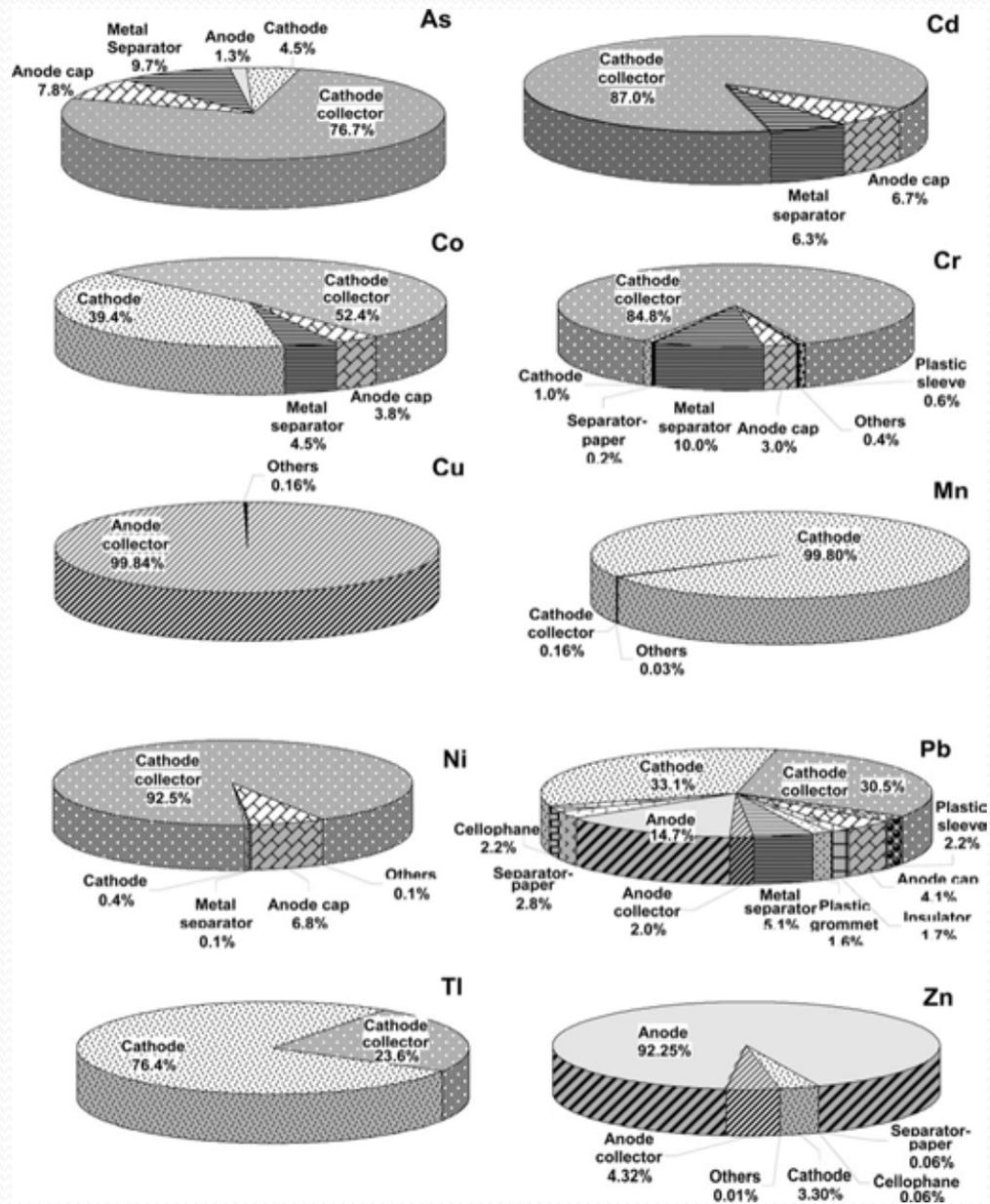
Vantaggi: tempo di vita più lungo, nessuna caduta di tensione anche ad elevata intensità di corrente erogata.

Svantaggi: costo, più elevato rispetto alle pile a secco.

Caratteristiche delle pile alcaline esaurite: (a) componenti e materiali; (b) contributo dei componenti nella composizione delle ceneri; (c) contributo dei componenti a più basso valore calorifico; (d) contenuto metallico. Altre inclusioni: As, Cd, Co, Hg, Pb, Sb, Si, Ti, V; (e) metalli pesanti nei componenti.



Contenuto metallico dei componenti delle pile alcaline esaurite



PRINCIPALI PROCESSI ATTUABILI

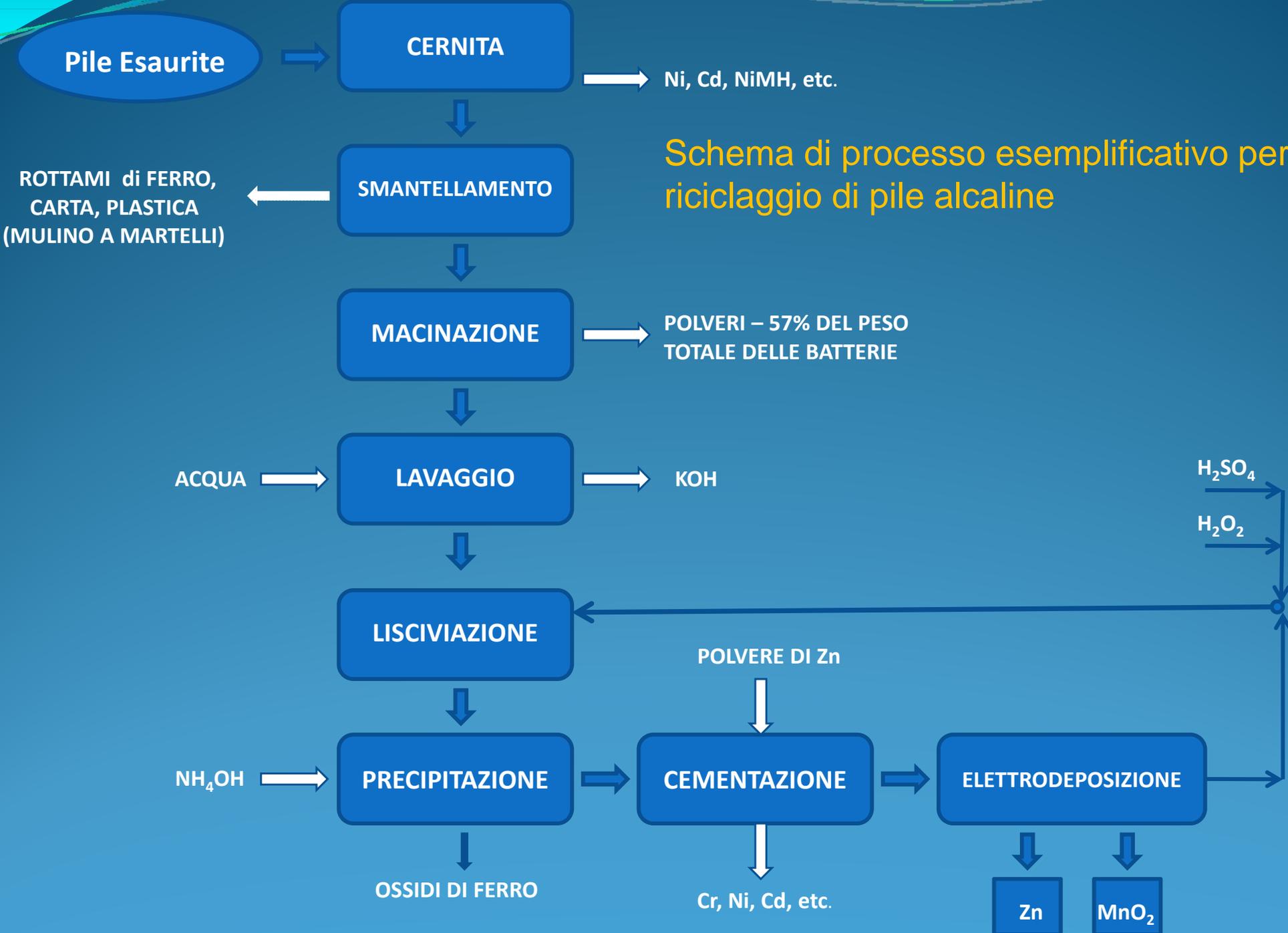
Pirometallurgici (comportano alto consumo energetico ed emissioni di fumi inquinanti)

Idrometallurgici (più economici ed a basso consumo energetico)

SPERIMENTAZIONE CONDOTTA

- 1 - Il presente lavoro sperimentale consiste nell'utilizzo di **tecnologie applicabili nel trattamento dei minerali** con dissoluzione e recupero dei metalli mediante **processi idrometallurgici**.
- 2 - I **prodotti** delle pile alcaline utilizzate avevano un contenuto pari al 16% in zinco ed al 37% in manganese, sotto forma di MnO_2 .
- 3 - Il processo idrometallurgico ha consentito la **dissoluzione delle specie metalliche** presenti.
- 4 - Il **recupero di Zn ed Mn** dalle soluzioni è stato attuato per *via elettrochimica*. Il processo elettrochimico è stato applicato a soluzioni aventi una concentrazione media pari a 10 g dm^{-3} di Mn e di 10 g dm^{-3} Zn.
- 5 - I risultati hanno dimostrato la **fattibilità tecnica** dell'applicazione delle suddette tecnologie; infatti, è stato ottenuto un recupero pressoché quantitativo del manganese (oltre 97 % MnO_2) e dello zinco disciolti in soluzione (98,5 % Zn).
- 6 - In tutte le condizioni operative si è ottenuto un deposito di MnO_2 e di Zn ad **elevato grado di purezza** (superiore al 90%), come dimostrano i risultati delle analisi condotte per mezzo delle tecniche diffrattometriche ai RX (RXD).

Schema di processo esemplificativo per il riciclaggio di pile alcaline



Caratterizzazione

Diffrazione ai Raggi X (XRD):

Zincite (ZnO), Quartz (SiO_2), Ossido di Manganese (Mn_2O_3), Ossido di Calcio e Manganese ($\text{Ca}_4\text{Mn}_2\text{O}_7$), Sylvite (KCl) and Ossido di Potassio (KO_2).

Analisi chimiche quantitative (ICP-MS):

37 % MnO_2

16 % Zn

4.9 % K

0.65 % Ni

0.6 % Fe

Lisciviazione

La totale dissoluzione di Zn e Mn si ottiene mediante una lisciviazione acida con **acido solforico**, utilizzando acido ossalico/perossido di idrogeno come riducente.

Si ottengono **solforati di zinco e manganese** ed altri metalli.

Carboidrati quali glucosio, saccarosio, lattosio, possono costituire un'alternativa a basso impatto ambientale (scarti di industrie agro-alimentari, zuccherifici).

La reazione chimica completa che avviene durante la dissoluzione del biossido di manganese con lattosio può essere descritta come di seguito:



Reazioni Elettrochimiche

Le reazioni che si verificano agli elettrodi nel corso della *deposizione del biossido di manganese* sono le seguenti:

reazione anodica:



reazione catodica:



Le seguenti reazioni avvengono agli elettrodi durante la *deposizione dello zinco*:

reazione catodica:



reazione anodica:



Strumentazione utilizzata per le prove di elettrochimica

- cella elettrolitica in vetro di capacità pari a 200 cm^3 , con camicia a circolazione d'acqua termostata e sistema magnetico di agitazione della soluzione;
- la cella è corredata di elettrodo di lavoro (W) costituito da retina in Pt di superficie pari a 100 cm^2 , controelettrodo (C) costituito da spirale in Pt ed elettrodo di riferimento a calomelano saturo (SCE);
- la cella è stata collegata ad un potenziostato-galvanostato AMEL mod. 555B equipaggiato con strumentazione di misura e controllo delle grandezze elettriche, integratore di corrente mod. 721 ed elettrometro differenziale mod. 631 della AMEL.

Soluzione utilizzata

$10 \text{ g dm}^{-3} \text{ Mn}$ e $10 \text{ g dm}^{-3} \text{ Zn}$ (in H_2SO_4 0,5 M).

Condizioni operative per la deposizione di MnO_2

nella deposizione del biossido di manganese **l'elettrodo di lavoro** è la retina in Pt utilizzata come **anodo** ed il **catodo** è la spirale in Pt, mentre l'elettrodo di riferimento (SCE) consente di condurre la elettrolisi a potenziale controllato.

Condizioni operative per la deposizione dello zinco

nella deposizione dello zinco, **l'elettrodo di lavoro** è la retina di platino utilizzata come **catodo**, **l'anodo** è la spirale di Pt e l'elettrodo di riferimento è l'elettrodo a calomelano saturo (SCE).

Principali condizioni sperimentali adottate per le prove di elettrodeposizione di MnO₂.

| FATTORI | VALORI |
|---|-----------|
| Anodo Vs. SCE (V) | 1.2-1.8 |
| Voltaggio di cella (V) | 2.2-2.8 |
| Intensità di corrente (mA) | 1000-1800 |
| Densità di corrente (mA/cm ²) | 10-18 |
| pH | 0.47-0.59 |
| Temperatura del bagno (°C) | 95 |
| Tempo (h) | 8 |
| Condizioni di agitazione (rivoluzioni per minuto) | 200 |

Principali condizioni sperimentali adottate per le prove di elettrodeposizione di Zn.

| Fattori | Valori |
|---|--------|
| Catodo Vs. SCE (V) | 1.45 |
| Voltaggio di cella (V) | 3.8 |
| Intensità di corrente (mA) | 1200 |
| Densità di corrente (mA/cm ²) | 12 |
| pH | 5 |
| Temperatura del bagno (°C) | 95 |
| Tempo (h) | 8 |
| Condizioni di agitazione (rivoluzioni per minuto) | 200 |

Prove di fattibilità per recupero elettrolitico di MnO_2

I seguenti risultati sono relativi a prove di fattibilità effettuate preliminarmente elettrolizzando soluzioni sintetiche di diversa tipologia contenenti Mn.

Risultati di prove di elettrodeposizione per il recupero anodico di MnO_2 dalle soluzioni.

| Condizioni | R (% Mn) | η^a (%) | E^b (kWh/kg) |
|--------------------------------|----------|--------------|----------------|
| Mn^{2+} | 99.31 | 89.99 | 1.44 |
| $Mn^{2+} + Fe^{3+}$ | 93.49 | 77.01 | 1.93 |
| $Mn^{2+} +$ lattosio | 99.41 | 69.48 | 2.21 |
| $Mn^{2+} + Fe^{3+} +$ lattosio | 95.47 | 67.35 | 2.30 |

η^a = rendimento faradico della corrente

E^b = consumo energetico

Riepilogo dei risultati

- Una sintesi dei principali risultati ottenuti nel corso delle prove di elettrodeposizione per il recupero selettivo di MnO_2 e Zn da soluzioni sintetiche contenenti Mn e Zn, entrambi a concentrazione di 10 g dm^{-3} , tramite elettrolisi, viene riportata nella tabella seguente.
- **Principali risultati delle prove di elettrodeposizione di MnO_2 e Zn da soluzioni sintetiche contenenti Mn e Zn.**

| Specie | R % | η (%) | E (kWh/kg) |
|----------------|-------|------------|------------|
| MnO_2 | 97,35 | 48,00 | 3,73 |
| Zn | 98,50 | 72,43 | 4,28 |

η = rendimento faradico

E= consumo energetico

Conclusioni

- I risultati hanno dimostrato la **fattibilità tecnica** dell'applicazione di tecnologie idrometallurgiche/elettrochimiche per il recupero di Zn e Mn da pile scariche.
- La possibilità di **riuso di sottoprodotti** dell'industria agro-alimentare (melasse) costituisce un aspetto innovativo e contribuisce ad abbassare i costi del processo e l'impatto ambientale dello stesso.
- Il processo di lisciviazione ha consentito la dissoluzione pressochè totale di Zn e Mn, mentre è stato ottenuto un **recupero** pressoché **quantitativo** del manganese (oltre 97 % MnO_2) e dello zinco disciolti in soluzione (98.50 % Zn).

Attività futura

- Prove sperimentali utilizzando sali quali $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ o $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, allo scopo di **abbassare i consumi energetici** e di **stabilizzare i valori di pH**.
- Esperimenti mediante aggiunta nel bagno elettrolitico di sali quali Na_2SO_4 - che aumentano la polarizzazione catodica - al fine di **incrementare** la scarsa **conducibilità** di ZnSO_4 .
- Applicazione del **processo in continuo**.

Applicazione di processi idrometallurgici al recupero di metalli di valore provenienti da reflui dell'industria elettronica e galvanica

Scopo delle ricerche

Scopo delle ricerche è lo sviluppo di un processo economico ed a basso impatto ambientale per il **recupero selettivo di Cu e Ni** contenuti nei fanghi industriali, minimizzando il contenuto in discarica alla fine del ciclo di trattamento.

Principali risultati

I risultati hanno dimostrato la fattibilità tecnica dell'applicazione delle **tecnologie IDROMETALLURGICHE/ELETTROCHIMICHE** nel recupero di Cu e Ni da fanghi industriali; infatti, è stato ottenuto un recupero pressoché quantitativo dei suddetti metalli (94 % Cu - 99 % Ni).

Introduzione

Presupposti dell'attività svolta:

- Molte industrie producono nel loro ciclo di lavorazione sostanze pericolose.
- La produzione mondiale di rifiuti industriali è in continuo aumento.
- Le notevoli quantità prodotte, giustificano lo studio di nuovi processi di recupero, anche per gli elevati costi dovuti a: trasporto, manipolazione e messa a dimora.
- E' importante ridurre la quantità di rifiuti e recuperare i prodotti di valore.

Stima della produzione mondiale di metalli di scarto prodotti da differenti settori produttivi

| Settore produttivo | Metalli | Quantità (t/anno) |
|--------------------------|------------------------|-------------------|
| Industria elettronica | As, Cr, Hg, Se, Ni, Cu | 1.200.000 |
| Olii e carbone | As, Pb, V, Cd, Ni, Zn | 1.200.000 |
| Minerario e metallurgico | Hg, Cr, Cu, As, Zn, Pb | 390.000 |
| Agricoltura | Mg, As, Cu | 1.400.000 |
| Manufatturiero | Cr, Co, Ni, Fe | 240.000 |
| Altre | | 720.000 |

| | |
|---|------------------------|
| Livello di produzione mondiale: | 7000 M ton/anno |
| Livello produzione E.U.: | 2200 M ton/anno |
| Livello di produzione in Italia: | 110 M ton/anno |

Tecnologie convenzionali per rimuovere metalli tossici da reflui industriali:

1. precipitazione con Ca(OH)_2 o NaOH
2. trattamento finale con resine a scambio ionico

MATERIALE UTILIZZATO NEL CORSO DEI PRESENTI STUDI

1. Reflui industriali raccolti negli impianti di depurazione in cui vengono trattati fanghi provenienti dalla lavorazione di circuiti stampati - Printed Circuit Boards (PCB).
2. In questo impianto si usa NaOH per precipitare i metalli pesanti in soluzione (Cu, Ni, Mn, Sn, Pb etc.), con successivo processo di trattamento con resine a scambio ionico.
3. I fanghi prodotti sono ricchi in metalli pesanti.

Composizione elementare di due lotti dei campioni usati

| elemento | O | Na | Al | Mg | Si | P | S | Cl | Ca | Mn | Fe | Ni | Cu | W | Sn | Pb |
|-------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|
| (%) lotto 1 | 38.1 | 1.5 | 0.8 | 0.2 | 2.3 | 3.1 | 3.9 | 6.9 | 4.2 | 6.5 | 3.9 | 13.0 | 9.2 | 1.7 | 3.2 | 3.4 |
| d.s.*(%) | 1.5 | 0.5 | 0.6 | 0.1 | 2.2 | 0.3 | 0.8 | 3.1 | 1.9 | 0.7 | 0.6 | 2.0 | 1.8 | 1.5 | 0.8 | 1.7 |
| (%)lotto 2 | 48.3 | 2.0 | 0.7 | 0.5 | 1.5 | 3.8 | 1.7 | 2.8 | 1.9 | 4.2 | 2.9 | 8.9 | 17.8 | 1.7 | 3.1 | 3.4 |
| d.s.*(%) | 1.6 | 0.5 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.9 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 1.5 | 0.3 | 1.7 |

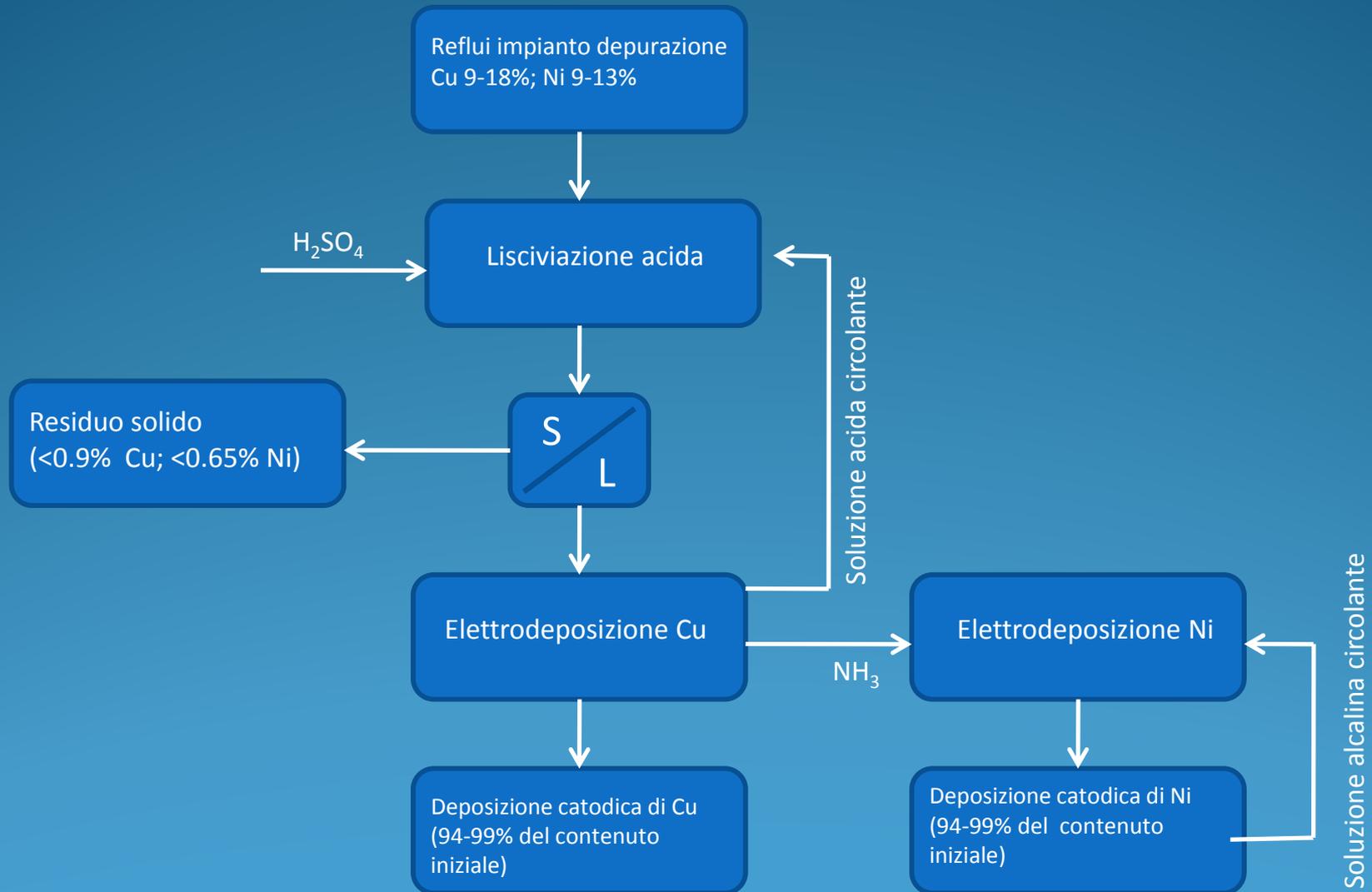
* d.s. = deviazione standard

SVILUPPO DI UN PROCESSO INTEGRATO PER LA RIDUZIONE DELLA QUANTITA' DI REFLUI DA SMALTIRE ED IL RECUPERO DI METALLI DI VALORE

FASI DEL PROCESSO

1. Campionamento
2. Caratterizzazione
3. Lisciviazione con H_2SO_4
4. Filtrazione
5. Recupero elettrochimico dei metalli di valore (Cu e Ni)

SCHEMA DEL PROCESSO PROPOSTO PER IL TRATTAMENTO DI FANGHI PROVENIENTI DA IMPIANTO DI DEPURAZIONE DI REFLUI INDUSTRIALI



LISCIVIAZIONE

Considerando che i *metalli* sono presenti nei fanghi studiati come *ossidi*, le principali reazioni stechiometriche che si suppone possano avvenire durante la lisciviazione sono le seguenti:



Mentre Ni e Cu passano in soluzione, il Pb rimane in fase solida sottoforma di PbSO_4 .

La bassa estrazione di manganese è dovuta al livello di ossidazione di tale metallo.

La possibile reazione di dissoluzione può essere la seguente:



Composizione elementare dei residui solidi prima e dopo il processo di lisciviazione (%P/P)

| | Prima della lisciviazione | | H ₂ SO ₄ 0.05 M | | H ₂ SO ₄ 0.10 M | | H ₂ SO ₄ 0.15 M | |
|----|---------------------------|------|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|
| | valore medio | d.s. | valore medio | d.s. | valore medio | d.s. | valore medio | d.s. |
| Na | 2.67 | 0.62 | 0.78 | 0.11 | 0.41 | 0.03 | 0.37 | 0.24 |
| Al | 0.54 | 0.01 | 0.66 | 0.37 | 0.83 | 0.05 | 0.96 | 0.07 |
| Si | 1.37 | 0.11 | 1.55 | 1.49 | 3.39 | 0.02 | 3.55 | 0.50 |
| P | 1.94 | 0.17 | 3.37 | 3.35 | 4.54 | 0.26 | 5.29 | 0.50 |
| S | 2.25 | 0.42 | 0.81 | 1.14 | 1.57 | 0.12 | 1.82 | 0.21 |
| Ca | 4.57 | 0.36 | 1.76 | 2.31 | 0.53 | 0.12 | 0.21 | 0.01 |
| Mn | 5.15 | 0.06 | 2.29 | 0.98 | 2.39 | 0.07 | 2.44 | 0.04 |
| Fe | 2.76 | 0.10 | 5.23 | 2.91 | 6.71 | 0.04 | 6.01 | 0.17 |
| Ni | 12.96 | 0.43 | 0.27 | 0.07 | 0.22 | 0.07 | 0.00 | 0.00 |
| Cu | 7.34 | 0.26 | 0.27 | 0.14 | 0.29 | 0.09 | 0.00 | 0.00 |
| Sn | 4.11 | 0.48 | 9.45 | 6.69 | 15.49 | 0.42 | 19.18 | 1.86 |
| Pb | 3.38 | 0.14 | 13.20 | 2.88 | 12.42 | 0.20 | 15.27 | 1.31 |
| Cl | 3.62 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

d.s. : deviazione standard

REAZIONI ELETTROCHIMICHE

Separazione selettiva Cu, Ni

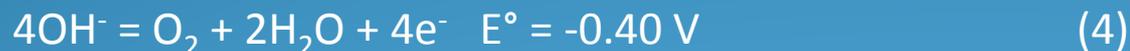
Deposizione catodica



La reazione catodica di deposizione di Cu è accoppiata alla seguente reazione anodica (in ambiente acido):

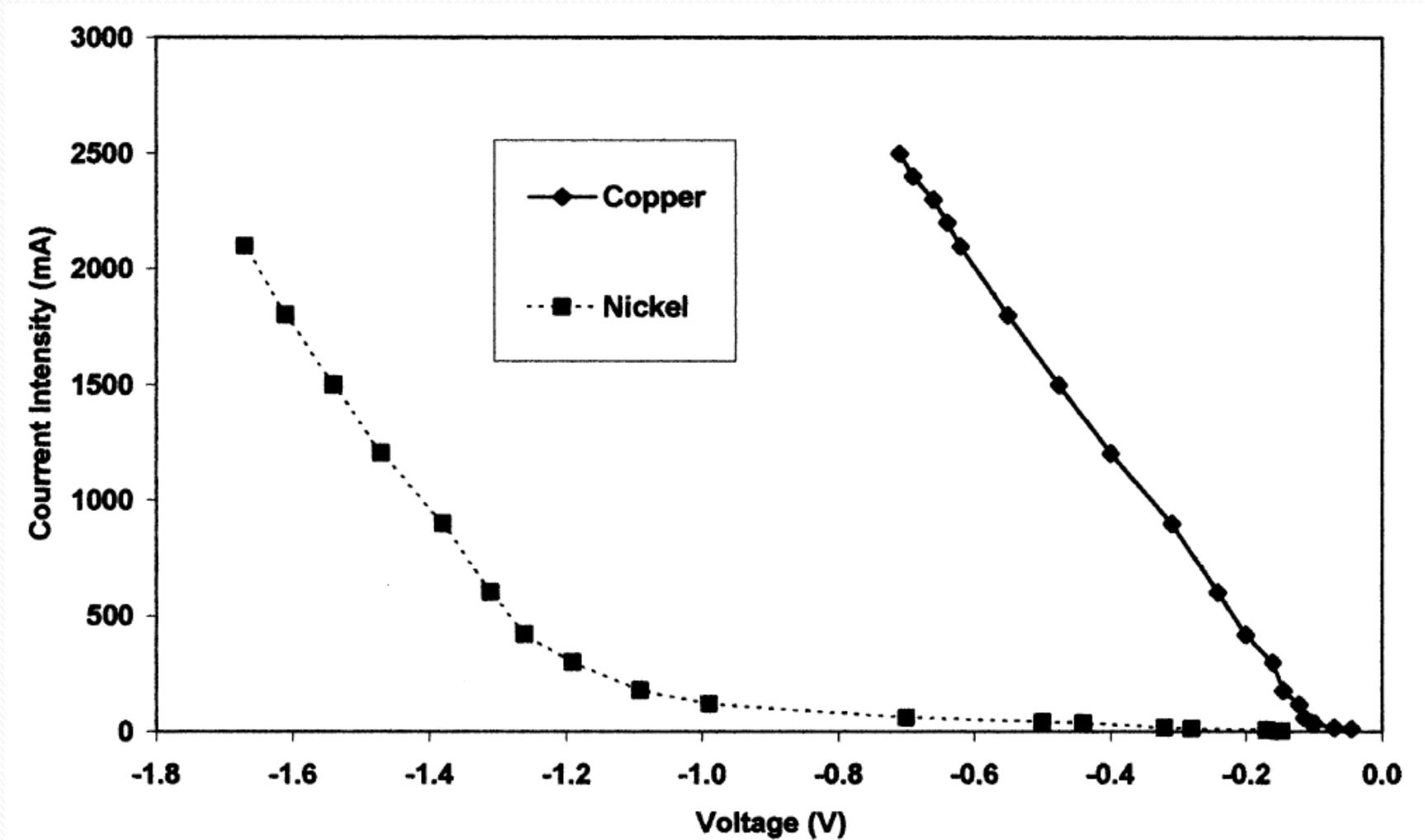


La reazione catodica di deposizione di Ni è accoppiata alla seguente reazione anodica (in ambiente basico):

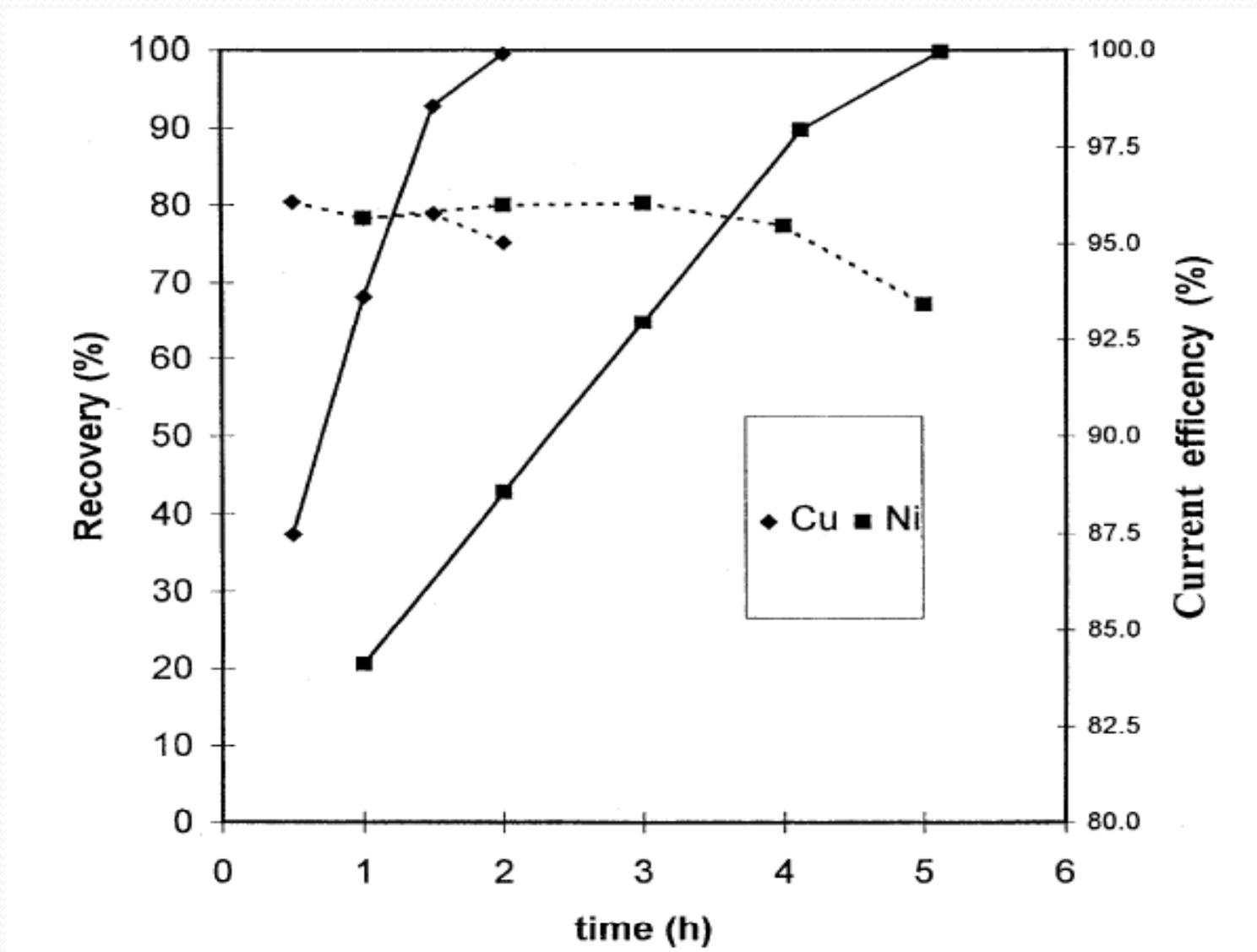


La deposizione selettiva di Cu e Ni è possibile perchè la loro *differenza di potenziale standard* è di circa 0.575 V.

Relazione tra corrente e voltaggio per la riduzione catodica di Cu e Ni a 40°C



Recuperi ed efficienza di corrente di Cu e Ni a 40°C a voltaggio catodico controllato



CONCLUSIONI

Lisciviazione:

1. H_2SO_4 come agente lisciviante;
2. Recuperi: 95-100 % Cu e Ni.

Processo elettrochimico:

1. Differenza di potenziale standard di 0.575 V,
2. Deposizione selettiva di Cu – Ni, nell'ordine Cu – Ni.
3. Deposizione Cu: pH 2-2.2 pH, potenziale catodico costante rispetto all'elettrodo di riferimento, valore di potenziale di -0.4 V vs. SCE (corrispondente ad un voltaggio di cella pari a 2.4 V) ed agitazione costante di 200 rpm.
1. Deposizione di Ni – dalla soluzione residua - a pH 10.5, potenziale catodico costante di -1.4 V vs. SCE (voltaggio di cella di 2.70 V) e agitazione di 200 rpm.
1. Efficienza di corrente: oltre 95%.
2. Consumi energetici 2.13 kWh kg⁻¹ (deposizione Cu) e 4.43 kWh kg⁻¹ (deposizione Ni).
3. Recuperi dopo il ciclo completo di trattamento (lisciviazione chimica/elettrodeposizione): 94-99%.
4. Depositi metallici aderenti al catodo, di buona morfologia, di eccellente qualità e purezza.

ATTIVITA' FUTURA

1. Determinazione della fattibilità economica su impianto pilota.
2. Attuazione del ciclo di lisciviazione-elettrodeposizione in scala maggiore , al fine di migliorare l'efficienza del processo.