



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio sperimentale sulle miscele coal water (CWF)

R. Ciccu, G. Mei, C. Tilocca



Dipartimento di Geingegneria e
Tecnologie Ambientali

Report RdS/2010/19

STUDIO SPERIMENTALE SULLE MISCELE COAL WATER (CWF)

Raimondo Ciccu, Giovanni Mei, Caterina Tilocca , Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e Fonti Energetiche

Tema: Tecnologie di gassificazione del carbone con cattura e sequestro della CO₂

Responsabile Tema: Paolo Deiana, ENEA

STUDIO SPERIMENTALE SULLE MISCELE COAL WATER (CWF)

INDICE

1. Premessa	3
1.1 Esperienze pregresse.....	3
1.2. Sviluppi successivi	3
1.3 Piano sperimentale	4
2. Influenza del chimismo dell'acqua sulle caratteristiche reologiche di miscele Coal Water.....	7
2.1 Studio della letteratura esistente.....	7
2.2 Prove sperimentali.....	10
2.3 Risultati ottenuti.....	16
3. Studio della fattibilità economica del trasporto del carbone dalla miniera di Nuraxi Figus alla centrale di Portovesme per mezzo di una pipeline. Cenni preliminari.	24
3.1 Note generali	24
3.2 Prove di laboratorio.....	30
3.3 Apparato sperimentale	31
3.4. Risultati ottenuti	32
4. La cella Hydrojet per la concentrazione del carbone da destinare alla produzione di CWF.....	34
4.1 Stato dell'arte nella tecnica di flottazione.....	34
4.2 Potenzialità della tecnologia waterjet sulla flottazione	40
4.3 Scale-up del concetto Hydrojet	47

1. Premessa

Le miscele acqua carbone (CWF Coal Water Fuel, ovvero CWS Coal Water Slurries o talora CWM Coal Water Mixtures) stanno guadagnando crescente interesse nel campo delle Clean Coal Technologies (CCT), cioè le tecnologie per l'uso del carbone con basso impatto ambientale.

Esse sono composte da carbone (in proporzioni variabili praticamente tra il 60 e il 70%, più frequentemente intorno al 65% in solidi), acqua e additivi chimici e possono essere usate sia come combustibile liquido alternativo ai prodotti petroliferi (uso preferibile), sia come un modo per trasportare, movimentare e stoccare il carbone.

Per soddisfare queste possibilità d'uso i CWF devono essere ottimizzati al fine di soddisfare in maniera bilanciata (sul piano economico) due obiettivi opposti: da un lato preparare un prodotto ad alta concentrazione di carbone per esigenze di combustione e dall'altro avere a disposizione un prodotto fluido e stabile per le esigenze di trasporto e stoccaggio.

1.1 Esperienze pregresse

Presso il DIGITA dell'Università di Cagliari è operante un gruppo di ricerca con la finalità di investigare sulle proprietà del CWF dal punto di vista chimico, fluidodinamico e applicativo con particolare riferimento al carbone Sulcis prodotto nella miniera sarda di Nuraxi Figus dalla Carbosulcis SpA.

Una prima fase del programma pluriennale di attività, oggetto di un primo contratto stipulato con ENEA, il gruppo di ricerca ha indagato in particolare su:

1. influenza del tipo di carbone sulla reologia e la stabilità dei CWF;
2. influenza della granulometria;
3. influenza del tipo e del dosaggio di reagente fluidificante;
4. influenza del tipo e del dosaggio di reagente stabilizzante.

Tali ricerche hanno mostrato che è tecnicamente possibile confezionare CWF di qualità anche con il carbone Sulcis, ritenuto finora inadatto a questo scopo.

1.2. Sviluppi successivi

I risultati ottenuti hanno costituito la base di partenza, per la successiva fase della ricerca oggetto del task program del secondo contratto con ENEA, orientata all'investigazione dei seguenti temi:

1. influenza del chimismo della fase acquosa sulle caratteristiche reologiche delle miscele;

2. studio preliminare circa la fattibilità economica di trasporto del carbone Sulcis come CWF dalla miniera alla centrale di Portovesme via pipeline.
3. studio di metodi di concentrazione del carbone alternativi e più efficienti di quelli tradizionali e complementari alla tecnologia di confezionamento del CWF;

1.3 Piano sperimentale

1.3.1 Importanza del chimismo della soluzione

Per quanto riguarda il primo punto si è inteso valutare in particolare il comportamento delle miscele al variare della concentrazione ionica nella fase acquosa. Finora, infatti, tutte le prove eseguite in fase 1 sono state effettuate con utilizzo dell'acqua distillata.

Un primo passo relativo allo studio del chimismo della fase acquosa è stato quello di capire se il carbone rilasciasse ioni durante l'agitazione della miscela.

È stato perciò preparato un campione di CWF con carbone Sulcis di granulometria definita "fine" (70% $-0,075\text{ mm}$; 30% $0,212\text{ mm}$), con aggiunta di Proxanol e Rhodopol come agenti fluidificanti e stabilizzanti e con rapporto acqua carbone 40/60 (cfr Rapporto sull'attività svolta in fase 1).

Il campione così preparato è stato miscelato per circa due ore, in linea con i tempi di durata rilevati in precedenza nella prima fase della ricerca.

I risultati dell'analisi dell'acqua prelevata dopo la sedimentazione dal suddetto campione sono riportati nella seguente tabella e sono confrontabili con l'analisi chimica elementare del carbone Sulcis. La tabella 1 mostra che in generale si hanno cambiamenti non trascurabili nella concentrazione ionica della fase acquosa del CWF dovuti al rilascio di ioni, in particolare Ca^{++} e Mg^{++} , ragione per cui alcuni comportamenti anomali riscontrati durante le prove sperimentali sulle prestazioni della miscela (stabilità, viscosità, tixotropia) possono trovare spiegazione nella variazione del chimismo dell'acqua, oltre ad altri fattori quali la temperatura.

Tabella 1: Analisi dell'acqua di sedimentazione del CWF

Analyte Symbol	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	Hg	K	Mg	Mn	Mo	Na
	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	%	%			
CARB	<0.3	0.2	3	19	<1	<2	1.08	<0.3	1	9	2	1.62	3	<1	0.01	0.4	28	3	0.06
Acqua ppm		6.81		0.02			51.44	0.01	0.11	0.01	0.11	61.8			0.25	316.71	2.05		13.61

	Ni	P	Pb	Sb	S	Sc	Sr	Te	Ti	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr			
	ppm	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm			
CARB	8	0	<3	<5	5.32	<4	140	<2	0.01	<5	<10	10	<5	2	6	<5			
Acqua ppm	0.58		0.02				1514								0.42				

La letteratura e alcune considerazioni emerse dalle suddette prove lasciano infatti intendere che il chimismo della fase acquosa di un CWF possa influenzare le sue caratteristiche reologiche e fluidodinamiche.

Pertanto si è ritenuto necessario indagare sul comportamento del CWF al variare della concentrazione ionica nella fase acquosa.

In effetti si sono subito riscontrate sostanziali differenze tra le prove effettuate con acqua distillata e analoghe prove effettuate con acqua di rete.

Poiché il sodio, il calcio e il magnesio sono tra gli elementi più comuni dell'acqua di rete (a Cagliari Ca 27 mg/l, Na 19 mg/l, Mg 12,4 Mg/l- studio Altroconsumo) si è ritenuto interessante verificare la relazione tra la concentrazione di questi ioni e le caratteristiche reologiche della sospensione di carbone nella fase acquosa.

1.3.2. Il problema del trasporto a distanza del carbone

Per quanto riguarda il secondo punto del programma operativo, l'obiettivo è stato quello di ottenere le informazioni economiche di base utili alla produzione di un modello basato sull'analisi costi benefici che metta in relazione l'attuale metodo di trasporto del carbone dalla miniera di Nuraxi Figus alla centrale elettrica di Portovesme con il trasporto del carbone come CWF via pipeline.

Oltre ai costi economici è necessario prestare attenzione ai costi sociali non immediatamente visibili ma estremamente importanti

1.3.3. Innovazione nelle tecniche di lavaggio del carbone

Infine al terzo punto del programma operativo proposto nell'ambito del contratto si è inteso illustrare i principi di base di una nuova tecnica basata sull'utilizzo di getti d'acqua ad alta pressione per migliorare le prestazioni della flottazione selettiva del carbone e ottenere un prodotto migliore ai fini della preparazione delle miscele coal-water.

Studi preliminari in cella da laboratorio hanno dato interessanti risultati tali da giustificare lo sviluppo ulteriore fino alla scala dimostrativa.

Si è pertanto ritenuto interessante includere sperimentazioni di significatività industriale con l'intento di sviluppare e mettere a punto una tecnica innovativa capace di fornire un prodotto di alta qualità per la preparazione del CWF.

Allo scopo si è provveduto a costruire una cella "Hydrojet" di dimensioni opportune inserita in un impianto pilota attualmente è in fase di allestimento comprendente il dispositivo di alimentazione

del carbone macinato in forma di torbida spessa, la lancia rotante water jet dotata di ugelli diametralmente opposti, la cella di flottazione e il sistema di raccolta dei prodotti.

Tale processo di arricchimento viene studiato tenendo presente che esso costituisce la penultima fase di un sistema che partendo dall'estrazione deve arrivare alla produzione di CWF di qualità, capace di competere con i prodotti petroliferi.

In questa ottica, la flottazione sarebbe lo stadio immediatamente precedente la preparazione del CWF con una semplice operazione di ispessimento e aggiunta di reagenti necessari per l'ottimizzazione delle prestazioni.

Il presente rapporto illustra e discute i risultati ottenuti nello sviluppo del programma operativo sopra delineato.

2. Influenza del chimismo dell'acqua sulle caratteristiche reologiche di miscele Coal Water

2.1 Studio della letteratura esistente

La ricerca bibliografica sul tema dell'influenza dell'ambiente chimico sul comportamento delle sospensioni di carbone in acqua non è stata ricca di informazioni. Le poche pubblicazioni interessanti provengono da istituzioni di ricerca americane e si riferiscono prevalentemente agli effetti della concentrazione ionica sulla viscosità della miscela.

L'influenza del chimismo sulle proprietà reologiche del CWF è stata tuttavia finora generalmente considerata secondaria rispetto a quella della granulometria e del rango del carbone, anche l'importanza dei fenomeni chimico-fisici all'interfaccia solido-liquido al fine di cercare di massimizzare la resa della miscela non deve essere certamente trascurata.

In definitiva, tre sono i fattori principali che controllano la reologia del CWF da impiegare in processi di combustione: la proporzione in peso (o in volume) di carbone rispetto all'acqua, lo spettro dimensionale del solido macinato e le forze di interazione scambiate tra le particelle in sospensione.

E' evidente che per una data distribuzione granulometrica la viscosità apparente (in corrispondenza a un determinato gradiente della tensione tangenziale) è funzione crescente della proporzione di carbone. L'esperienza dimostra che la carica massima di solidi per un dato tipo di carbone può variare tra 65 e 70%, eccezionalmente 75%.

L'effetto della granulometria sulla "consistenza" delle sospensioni acquose, per un dato contenuto di solidi, è stato intensamente studiato essendo universalmente riconosciuta la sua importanza pratica.

E' un fatto ormai definitivamente acquisito che un valore minimo della viscosità apparente, per un dato gradiente della tensione tangenziale, si ottiene realizzando una distribuzione continua e molto dispersa della fase solida. Il riferimento suggerito è quello della distribuzione bimodale ritenuto più rispondente alle esigenze di contemporaneo controllo della stabilità e della fluidità della miscela (soluzione di compromesso).

Si è cercato anche di costruire modelli predittivi sulla base dei dati sperimentali ma la loro affidabilità non appare sufficiente per valutazioni preventive affidabili, per cui è consigliabile ricorrere sempre a esperimenti diretti per misurare l'effettiva viscosità, anche a causa della possibile influenza di fattori non considerati nel modello e in considerazione della complessità del sistema.

Il comportamento fluido della sospensione è caratteristico di quelle miscele solido-liquido

finemente disperse nelle quali sono presenti forze elettrostatiche repulsive a largo raggio di azione sufficientemente forti, tali da ostacolare l'avvicinamento mutuo delle particelle solide. Se questa condizione si verifica è possibile evitare che su di esse agiscano le forze a corto raggio di azione quali quelle di Van der Waals responsabili dello sviluppo di fenomeni di aggregazione e flocculazione che portano a un aumento della viscosità (e a una diminuzione della stabilità)..

Le forze elettrostatiche interagenti tra le particelle solide in sospensione dipendono principalmente dalle caratteristiche superficiali e dalle proprietà della fase fluida (natura del liquido puro, tipologia e concentrazione degli ioni passati in soluzione e condizioni di acidità/basicità espresse dal valore del pH).

Nelle miscele acqua-carbone, le particelle non possiedono le stesse proprietà superficiali a causa dell'eterogeneità della composizione macerale legata al rango del carbone e del diverso grado di ossidazione delle singole specie. Il quadro è complicato dalla presenza di una varietà di materie minerali che danno luogo alle ceneri di combustione, le quali possono rilasciare ioni in soluzione o comunque interagire con le particelle di carbone.

L'intensità delle forze repulsive di natura elettrostatica scambiate dalle particelle è tradizionalmente descritta dal valore del "potenziale Zeta" (o Z-potenziale), funzione del pH.

Per un dato livello del pH, che esprime la concentrazione degli ioni H^+ in soluzione, il valore dello Z-potenziale è funzione del tipo e concentrazione degli altri ioni in soluzione.

Maggiore è in valore assoluto dello Z-potenziale, più grandi sono le forze di repulsione tra le particelle, con conseguente più elevato grado di dispersione della sospensione cui corrisponde una diminuzione della viscosità.

Per i sistemi nei quali le particelle solide hanno un valore negativo dello Z-potenziale, come nel caso della maggior parte dei carboni, l'aggiunta (o la presenza) di cationi nella fase liquida riduce il valore assoluto dello Z- potenziale.

I cationi polivalenti hanno un effetto molto maggiore di quelli monovalenti e quelli trivalenti presentano un più alto potere flocculante dei bivalenti.

La natura degli anioni non riveste importanza significativa nei sistemi nei quali le particelle solide presentano un valore negativo dello Z-potenziale.

Analogamente, anche nel campo dei valori positivi dello Z- potenziale gli elettroliti giocano un ruolo simile, con la differenza che in questo caso sono gli anioni ad assumere un'importanza determinante.

Come si è sopra ricordato, il controllo della reologia dei CWF è generalmente affidato all'azione di additivi chimici con funzione fluidificante e/stabilizzante, spesso introdotti congiuntamente nella sospensione in opportuna combinazione.

L'uso degli additivi rappresenta una voce di costo importante nella preparazione dei CWF a causa del loro prezzo di mercato relativamente alto, per cui, anche se impiegati con disaggi contenuti, variabili tra 0,1 e 1% in peso della miscela (<0,5% del peso di carbone) contribuiscono al costo unitario del CWF nella misura di diverse decine di Euro per ogni tonnellata di prodotto.

Ricerche recenti, sviluppate soprattutto presso istituzioni scientifiche americane, indicano che un eventuale comportamento caratterizzato da eccessiva "consistenza" (valori della viscosità anomali) di un CWF possono essere attribuiti alla presenza di cationi inorganici rilasciati dallo stesso carbone e soprattutto dai componenti mineralogici non combustibili.

Tali cationi sono anche ritenuti responsabili delle differenze nei parametri reologici osservate in miscele che altrimenti dovrebbero presentare le stesse proprietà.

In particolare risulta che cationi multivalenti quali Al^{3+} , Ca^{++} e Mg^{++} esercitano un'influenza in senso peggiorativo sulle prestazioni della miscela, in misura maggiore rispetto a ioni monovalenti quali Na^+ , per citare solo gli elementi più frequentemente presenti nella fase acquosa dei CWF.

La dimostrazione di questo effetto è supportata dall'osservazione sperimentale del sensibile abbassamento della viscosità della miscela quando questa è sottoposta a ripetuti lavaggi con acqua distillata o messa a contatto con resine scambiatrici di ioni.

E' tuttavia da evidenziare che la semplice rimozione degli ioni inizialmente presenti non è sufficiente ai fini pratici a causa del continuo rilascio di nuovi ioni in soluzione da parte dei componenti del carbone fino al completo esaurimento della carica ionica potenziale.

Pertanto al fine di rendere la tecnica interessante ai fini pratici occorre far ricorso a sostanze chimiche di basso costo capaci di far precipitare immediatamente i cationi sotto forma di composti insolubili, in alternativa al lento processo affidato a operazioni di lavaggio o cattura.

A questo proposito sembra logico cercare di utilizzare i composti chimici utilizzati per l'addolcimento delle acque quali il carbonato di sodio e l'idrato di calcio da aggiungere alla soluzione al fine di eliminare per precipitazione almeno gli ioni Ca e Mg dalla fase acquosa del CWF.

Per una efficace riuscita della tecnica è necessario determinare attentamente le quantità di reagenti da immettere per evitare di avere un effetto controproducente in caso di dosaggio eccessivo rispetto a quello strettamente necessario per far precipitare gli ioni inizialmente presenti nell'acqua e quelli rilasciati dalla matrice carboniosa e dalle materie minerali ad essa associate.

Sono stati proposti modelli e algoritmi implementabili su calcolatore per determinare il dosaggio di soda e calce in funzione delle concentrazioni di ioni Ca e Mg sulla base delle reazioni chimiche che portano alla formazione di carbonato di calcio e idrato di magnesio.

D'altro canto occorre rilevare che le quantità necessarie per eliminare totalmente gli ioni dalla

soluzione potrebbero essere alquanto maggiori di quelle puramente stechiometriche suggerite dal modello a causa dell'incompletezza delle reazioni che richiedono un tempo relativamente lungo per potersi sviluppare compiutamente.

Il ricorso all'azione congiunta della soda e della calce per far precipitare gli ioni Ca e Mg ai fini della riduzione della viscosità della sospensione acqua-carbone risulta più efficace se combinata con l'aggiunta di un additivo disperdente/fluidificante, quale per esempio un sale sulfonato di ammonio-naftalene. Prove sperimentali mostrano che dosaggi adeguati dell'ordine dello 0,2% dei tre reagenti sopra menzionati può portare al dimezzamento della viscosità della miscela.

E' da rilevare che il controllo del chimismo della soluzione può teoricamente offrire un contributo molto interessante alla soluzione del problema, tipico delle sospensioni, di dover contemporaneamente assicurare una stabilità nel tempo lungo (dell'ordine dei molti giorni intercorrenti tra il momento della preparazione e quello dell'utilizzazione della miscela) accompagnata da una buona fluidità per rendere la miscela pompabile con limitati impegni energetici.

In effetti il ricorso a una maggiore finezza di macinazione se da un lato può migliorare la stabilità, dall'altro causa inevitabilmente un aumento della viscosità rendendo più oneroso il trasporto in condotta del CWF.

Anche l'uso degli additivi se non correttamente combinati può comportare effetti mutuamente contrastanti con possibile neutralizzazione parziale dell'esito finale.

Pertanto è molto importante studiare attentamente sul piano teorico il meccanismo alla base delle interazioni di natura chimico-fisica all'interfaccia solido-liquido e comprenderne le basi scientifiche

2.2 Prove sperimentali

Per quanto sopra detto appare pienamente giustificata l'attenzione rivolta dal programma sperimentale finalizzato a verificare l'efficacia del controllo del chimismo della soluzione

Le prove sperimentali relative allo studio dell'influenza del chimismo sono state effettuate utilizzando il carbone proveniente dalla miniera di Nuraxi Figus previo opportuno trattamento granulometrico.

2.2.1 Preparazione dei campioni

Il carbone è stato infatti sottoposto a una fase di frantumazione a secco con frantoio a mascelle Fisher e successivamente a una fase di macinazione a secco con mulino a barre in circuito chiuso. Lo schema del trattamento granulometrico è illustrato nella figura 1.

I due prodotti derivanti da questa fase denominati – 0,212 mm (“grosso”) e – 0,075 mm (“fine”) sono stati miscelati in proporzione 70% “fine” e 30 % “grosso” al fine di ottenere un prodotto finale sul quale sono stati effettuati l’analisi immediata per via strumentale con l’apparecchio LECO MAC 400 e la curva granulometrica illustrate nella tabella e 2 e graficamente nella Figura 2.

Figura 1: Flowsheet delle operazioni di comminuzione del carbone

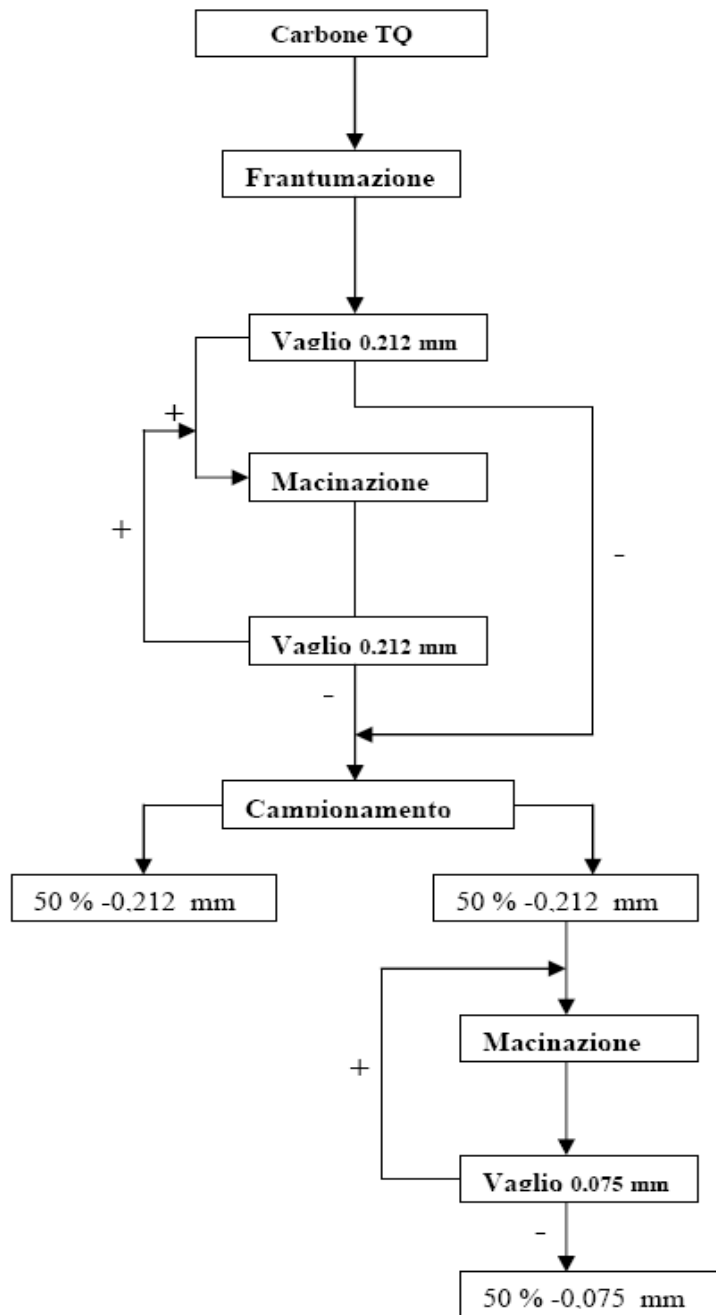
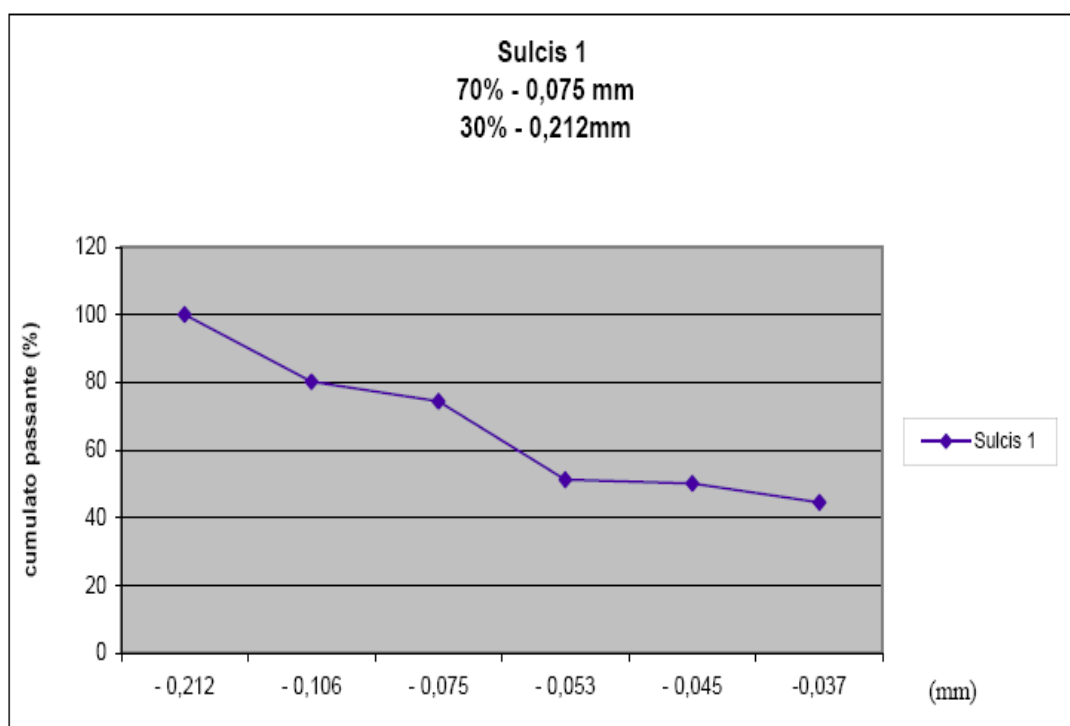


Tabella 2: Analisi immediata carbone Sulcis 70% fine 30% grosso

	T.Q.	DRY
	g%	g%
Umidità	8,07	
Materie Volatili	47,59	52,12
Ceneri	7,87	8,56
C. Fisso	36,46	39,66

Figura 2: Curva granulometrica



Il potere calorifico superiore, determinato mediante calorimetro adiabatico di Parr è risultato pari a 6848 kcal/kg. La massa volumica determinata mediante picnometro AccuPyc 1330, è risultata essere 1,4285 g/cm³.

Tale combinazione granulometrica ha mostrato un'influenza positiva sulle caratteristiche reologiche di CWS preparati con carbone Sulcis, pertanto si è scelto di mantenerla per tutta la campagna di prove in oggetto.

Figura 3 Mulini a barre utilizzati per la macinazione del carbone



È stato scelto di effettuare le prove su campioni del peso di 300 g, con rapporto carbone acqua di 55-45%, in modo da ottenere miscele dense senza incorrere nelle difficoltà di prelievo che si sono riscontrate per campioni troppo densi.

Tali precauzioni si sono rese necessarie dal momento che l'unico parametro da variare durante l'esecuzione delle prove, era il chimismo dell'acqua sotto forma di aggiunta di ioni all'acqua distillata. In questa ottica vengono mantenuti fissi, oltre alla quantità e alla granulometria del carbone, anche gli additivi e le loro concentrazioni.

Secondo le indicazioni emerse dal precedente studio sono stati utilizzati due reagenti industriali, il Rhodopol quale agente stabilizzante e il Proxanol quale fluidificante della miscela. Entrambi gli additivi sono stati preparati e dosati in forma di soluzione in acqua distillata.

Ogni campione è dunque caratterizzato dalle quantità in peso (g) riportate nella seguente tabella 3:

Tabella 3: Composizione tipica di un campione per le prove

	Descrizione	Peso (g)
Carbone	70% -0,075 mm /30% -0,212 mm	165
Rhodopol	Soluzione in acqua distillata allo 0,02%	24,550
Proxanol	Soluzione in acqua distillata al 7%	3,886
Acqua	Acqua distillata + Sali di sodio, calcio e magnesio	106,59
TOTALE		300

Si è fatto variare il chimismo dell'acqua modificando la concentrazione di ioni sodio, calcio e magnesio aggiungendo all'acqua distillata concentrazioni crescenti di sali di questi elementi in soluzione (tabella 5).

Le composizioni della fase liquida per le diverse prove prima dell'introduzione dei campioni di carbone sono indicati nella seguente tabella 4.

Tabella 4: Condizioni sperimentali della campagna di prove eseguite

	Dosaggio dei singoli elementi	Composizione della soluzione base
Campione 1		H ₂ O distillata
Campione 2		H ₂ O di rete
Campione 3	Na 15 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl
Campione 4	Na 30 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl
Campione 5	Na 45 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl
Campione 6	Na 90 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl
Campione 7	Ca 15 mg/l	H ₂ O distillata + CaCl ₂ *2 H ₂ O
Campione 8	Ca 30 mg/l	H ₂ O distillata + CaCl ₂ *2 H ₂ O
Campione 9	Ca 45 mg/l	H ₂ O distillata + CaCl ₂ *2 H ₂ O
Campione 10	Ca 90 mg/l	H ₂ O distillata + CaCl ₂ *2 H ₂ O
Campione 11	Mg 15 mg/l	H ₂ O distillata + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 12	Mg 30 mg/l	H ₂ O distillata + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 13	Mg 45 mg/l	H ₂ O distillata + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 14	Mg 90 mg/l	H ₂ O distillata + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 15	Na + Ca 15 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl + CaCl ₂ *2 H ₂ O
Campione 16	Na + Ca 30 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl + CaCl ₂ *2 H ₂ O
Campione 17	Na + Ca 45 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl + CaCl ₂ *2 H ₂ O
Campione 18	Na + Ca 90 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl + CaCl ₂ *2 H ₂ O
Campione 19	Na + Mg 15 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 20	Na + Mg 30 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 21	Na + Mg 45 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 22	Na + Mg 90 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 23	Ca + Mg 15 mg/l	H ₂ O distillata + CaCl ₂ *2 H ₂ O + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 24	Ca + Mg 30 mg/l	H ₂ O distillata + CaCl ₂ *2 H ₂ O + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 25	Ca + Mg 45 mg/l	H ₂ O distillata + CaCl ₂ *2 H ₂ O + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 26	Ca + Mg 90 mg/l	H ₂ O distillata + CaCl ₂ *2 H ₂ O + MgCl ₂ *6 H ₂ O
Campione 27	Na 45 mg/l	H ₂ O distillata + (COONa) ₂
Campione 28	Na 45 mg/l	H ₂ O distillata + NaHCO ₃
Campione 29	Na 45 mg/l	H ₂ O distillata + CH ₃ COONa + 2 H ₂ O
Campione 30	Na + Ca + Mg 30 mg/l	H ₂ O distillata + NaCl + CaCl ₂ *2 H ₂ O + MgCl ₂ *6 H ₂ O

I sali utilizzati per la preparazione delle soluzioni di base sono rappresentati nella tabella 5. Essi sono prevalentemente cloruri ma per il sodio sono state utilizzate anche altre forme per verificare l'eventuale influenza dell'anione che tuttavia, secondo la letteratura, dovrebbe essere comunque secondaria nel caso del Sulcis di cui è nota la tendenza ad acquisire cariche superficiali negative

Tabella 5: Sali utilizzati per lo studio degli effetti del chimismo

<i>Nome</i>	<i>Formula chimica</i>
Cloruro di Sodio	NaCl
Cloruro di Calcio	CaCl ₂ *2 H ₂ O
Cloruro di Magnesio	MgCl ₂ *6 H ₂ O
Ossalato di Sodio	(COONa) ₂
Bicarbonato (o Carbonato acido) di Sodio	NaHCO ₃
Acetato di Sodio	CH ₃ COONa + 2 H ₂ O

I campioni sono stati miscelati per mezzo di un agitatore/flocculatore concepito sia per l'ottimizzazione dei dosaggi di coagulanti per la separazione di inquinanti negli impianti di depurazione di acque reflue, sia per effettuare test di cessione di sostanze tossiche su rifiuti solidi destinati a discarica (Figura 4).

La struttura metallica ospita un motore elettrico collegato a sei alberi in acciaio inox, regolabili in altezza e provvisti all'estremità di una paletta rettangolare, ortogonale rispetto all'asse di rotazione.

La rotazione; regolabile in velocità; è trasmessa identica ad ogni barra del flocculatore. La velocità di rotazione è regolabile tramite un interfaccia nella quale possiamo impostare il numero di giri per minuto desiderato (rpm) e un timer; il pannello in plexiglas posto posteriormente ai campioni è retroilluminabile, per permettere una migliore analisi dei campioni in esame.

Figura 4. Batteria di agitatori usata per miscelare i CWF



I campioni inizialmente si presentavano pastosi e si è dovuto aumentare la velocità di giri al minuto gradualmente e variare continuamente la regolazione in altezza di ogni singola barra.

Una volta stabilizzata la miscela in forma fluida si è lasciato il macchinario su 106 rpm per circa due ore e mezza.

La miscela è apparsa in tutti i campioni omogenea e dotata di buona fluidità se agitata continuamente. Se venisse meno la continua agitazione della miscela si segnalerebbero fenomeni importanti di sedimentazione.

2.3 Risultati ottenuti

2.3.1. Studio della reologia della miscela

Per ogni campione sono state effettuate misure di viscosità e tiorotropia mediante viscosimetro, e di stabilità mediante test di sedimentazione in cilindro graduato secondo le metodologie e utilizzando le apparecchiature descritte il dettaglio nel rapporto relativo alla fase 1 della ricerca.

I risultati sono illustrati nella tabella 6 che segue.

Tabella 6: Quadro sintetico dei risultati delle prove

Acque	Vol H ₂ O chiara [%]	Tiorotropia [Pa/s]	Viscosità [mPa*s]
H ₂ O distillata	7,87	12,41	95,25
H ₂ O rete	6,41	19,47	146,00
Na 15	9,54	25,94	183,30
Na 30	6,80	26,24	207,67
Na 45	9,09	35,45	193
Na 90	6,78	23,25	186
Ca 15	13,15	27,37	188,66
Ca 30	6,50	20,37	150,33
Ca 45	7,5	29,06	215,33
Ca 90	13,5	24,71	199,33
Mg 15	10,70	19,52	155,50
Mg 30	5,95	26,77	185,00
Mg 45	7,14	25,01	179,66
Mg 90	13,51	24,51	175
Na + Ca 15	7,90	24,00	199,00
Na + Ca 30	9,00	25,70	206,50
Na + Ca 45	9,09	24,39	183,66
Na + Ca 90	8,57	30,63	224
Na+Mg 15	10,95	48,52	224,33
Na+Mg 30	7,66	22,42	151,33
Na + Mg 45	10,84	25,27	201,66
Na + Mg 90	12,79	27,18	215,33
Ca+Mg 15	5,45	31,01	199,00
Ca+Mg 30	9,95	8,86	66,03
Ca + Mg 45	9,52	28,09	183,30
Ca + Mg 90	12,5	30,02	238,66
Na 45 ossalato	11,42	23,23	155,33
Na 45 carbonato	8,33	24,31	156
Na 45 acetato	7,66	31,24	214
Ca+Na+Mg 30	10,13	27,34	185,00

Stabilità

Per quanto riguarda lo studio della stabilità misurata in funzione delle concentrazioni dei singoli sali si rileva una variazione significativa del comportamento della miscela (figura 5)

Infatti all'aumentare della concentrazione ionica di Ca^{++} e Mg^{++} la stabilità migliora fino a un valore minimo corrispondente a circa 30 mg/l di dosaggio e quindi progressivamente peggiora al crescere della concentrazione oltre tale valore.

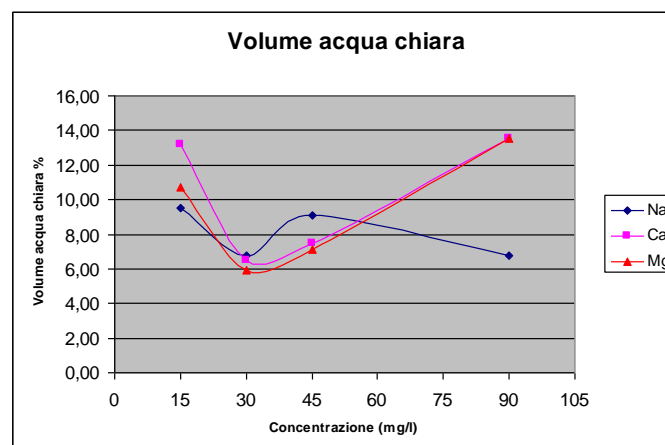
Un'influenza diversa e apparentemente meno importante presenta lo ione Na^+ per il quale l'aumento della concentrazione nella soluzione base non sembra modificare in misura significativa la stabilità. L'andamento oscillante potrebbe essere semplicemente dovuto a modifiche non controllabili delle condizioni sperimentali.

In definitiva sembra che l'influenza determinante per quanto riguarda il peggioramento della stabilità alle alte concentrazioni sia quella determinata dagli ioni Ca^{++} e Mg^{++} presenti nella fase acquosa sia singolarmente sia in combinazione equilibrata tra loro, mentre si osserva che lo ione Na^+ svolge un ruolo meno importante o addirittura un'azione mitigatrice se presente insieme a ciascuno dei due elementi precedenti. (figura 5 bis)

Questi risultati trovano riscontro nelle indicazioni della letteratura che confermano l'importanza degli ioni multivalenti rispetto ai monovalenti nel determinare l'entità delle forze repulsive di natura elettrostatica capaci di ostacolare la tendenza delle particelle ad aggregarsi per effetto delle forze di attrazione che agiscono a corta distanza.

Figura 5. Elaborazione grafica effetti del chimismo sulla stabilità del CWF

a) Aggiunta singoli sali

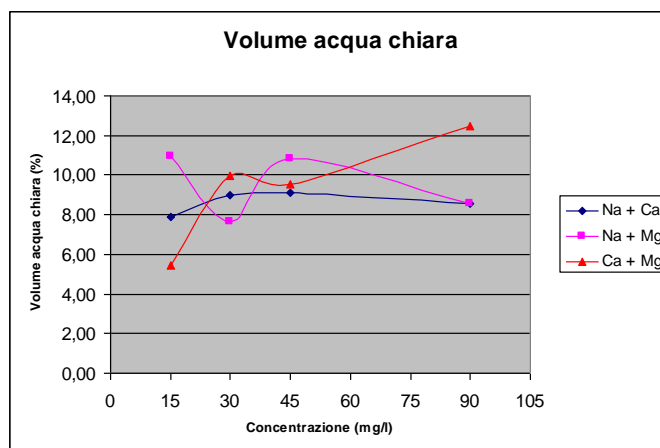


L'effetto favorevole delle aggiunte di piccole quantità di Ca e Mg può essere quindi spiegato dallo sviluppo di processi di precipitazione degli ioni rilasciati dai componenti del carbone, mentre

ulteriori incrementi rispetto al dosaggio stechiometrico necessario per la formazione di composti non solubili (carbonato di calcio e idrossido di magnesio) comporterebbero il progressivo prevalere degli effetti negativi, come segnalato nel paragrafo dedicato all'esame dello stato dell'arte fornito dalla letteratura.

Figura 5 bis: Elaborazione grafica effetti del chimismo sulla stabilità del CWF

b) Aggiunta sali accoppiati



Viscosità

A prima vista la presenza di ioni singoli non sembra avere particolare importanza per la viscosità nel campo delle concentrazioni superiori ai 45 mg/l mentre appare una influenza più marcata per piccoli dosaggi.

In particolare non riesce possibile trarre considerazioni affidabili sul piano scientifico dall'esame delle curve che rappresentano la viscosità in funzione della concentrazione dei sali singoli nella soluzione di partenza a causa del loro andamento oscillante intorno a un valore sostanzialmente costante salvo per li ione Ca^{++} la cui aggiunta provoca prima una diminuzione e quindi un aumento fino a un valore più stabile alle concentrazioni elevate. (Figura 6)

Pur nell'incertezza dell'andamento della curva, anche questa osservazione non è tuttavia in contraddizione con quanto esposto in letteratura sulla presenza di un minimo del valore della viscosità intorno a 30 g/l, punto di minimo anche per la stabilità, come si è sopra detto. .

Per quanto riguarda l'aggiunta di sali combinati, l'indicazione dei dati sperimentali sembra molto più chiara (Figura 6 bis). Infatti la combinazione degli ioni Ca^{++} e Mg^{++} produce sulla viscosità un effetto evidente che si manifesta in un primo abbassamento significativo e importante della viscosità all'aumentare del dosaggio fino a 30 mg/l a cui corrisponde un valore minimo pari a circa $\frac{1}{4}$ del valore iniziale prima dell'aggiunta di sali. Dopo tale minimo la viscosità risale rapidamente superando il valore iniziale.

La presenza del sodio svolge un ruolo di mitigazione degli effetti soprattutto per quanto riguarda l'ione Ca^{++} , minore per lo ione Mg^{++} per il quale la curva relativa alla combinazione con il sodio presenta un andamento simile al caso della combinazione con il Ca sia pure con oscillazioni più contenute.

Nella combinazione $\text{Ca}^{++} + \text{Na}^+$ la viscosità tende a rimanere sostanzialmente stabile sui valori elevati iniziali con un andamento molto simile a quello riscontrato nel caso del dosaggio singolo dello ione Na^+ .

Figura 6 Elaborazione grafica effetti del chimismo sulla viscosità del CWF

a) Aggiunta singoli sali

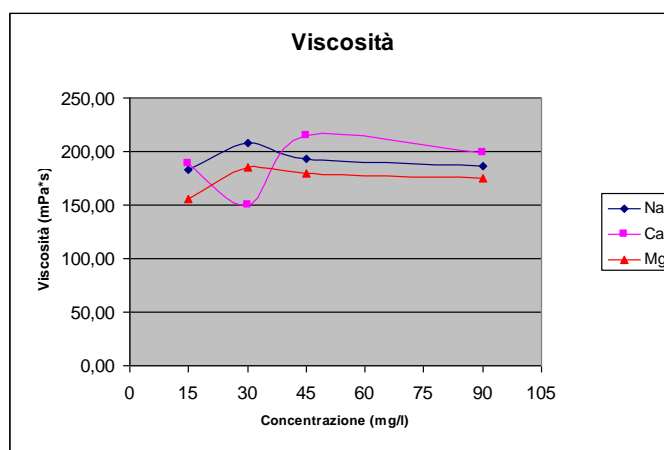
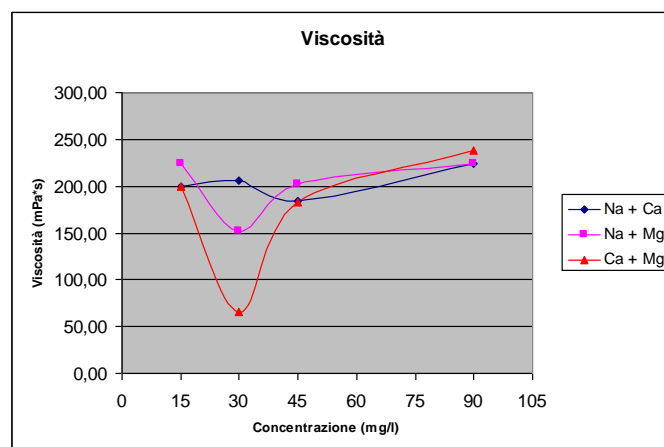


Figura 6 bis. Elaborazione grafica effetti del chimismo sulla viscosità del CWF

b) Aggiunta sali accoppiati



Riunendo insieme le considerazioni relative alla stabilità e alla viscosità, sembra che, nel caso del CWF realizzato con carbone Sulcis in presenza degli additivi stabilizzante e fluidificante, una

moderata aggiunta di sali di Ca e Mg, relativamente poco costosi, può avere effetti complessivamente interessanti sulle prestazioni del CWF.

Al contrario lo ione sodio sembra importante solo nel caso in cui si debba intervenire per moderare l'effetto di eccessivo rilascio di ioni Ca^{++} e Mg^{++} in soluzione da parte dei componenti del carbone o già presenti nell'acqua "dura" di partenza.

Tissotropia

La tissotropia è la proprietà di certi gel, liquidi puri o sospensioni di solidi in fase acquosa che in condizioni normali di riposo sono molto viscosi ma tendono ad assumere comportamento fluido in funzione del tempo quando sono sottoposti ad azioni di squotimento, agitazione o comunque sottoposti a densioni che provocano il movimento.

In termini più tecnici alcuni fluidi non Newtoniani pseudoplastici presentano variazioni di viscosità dipendenti dal tempo: più a lungo sono sottoposti ad azioni di sollecitazione meccanica, minore è la loro viscosità.

Un fluido si definisce tissotropico quando richiede un tempo finito per raggiungere un valore costante della viscosità quando sottoposto a incrementi dell'azione di taglio.

La concentrazione di ioni singoli non sembra avere particolare influenza sulla tissotropia per concentrazioni della soluzione di partenza superiori ai 45 mg/l mentre compare una influenza più marcata per dosaggi inferiori. (Figura 7)

In effetti a concentrazioni intorno a 90 mg/l i valori della tissotropia convergono indipendentemente dalla composizione ionica della soluzione. Al contrario appaiono ben differenziati per concentrazioni dei sali singoli intorno a 45 mg/l con eccezione del Mg. In questo campo di dosaggi un ruolo importante è assunto soprattutto dallo ione Na^+ la cui aggiunta nella soluzione di partenza fa aumentare la tissotropia nella misura del 40% rispetto al valore iniziale. Un effetto simile si osserva anche per lo ione Ca^{++} seppure con incremento più contenuto rispetto al valore iniziale ma considerevole rispetto al minimo osservato in corrispondenza del dosaggio di 30 mg/l.

Lo stesso dicasi per l'aggiunta di sali combinati dove si nota che la combinazione magnesio + sodio produce CWF tendenzialmente più tissotropici per gli alti dosaggi. (Figura 7 bis)

In questo caso si nota anche una forte caduta iniziale della tissotropia quando si utilizzano combinazioni di sali comprendente il sodio che tuttavia viene recuperata al crescere del dosaggio fino a portarsi su valori apparentemente stabili per dosaggi >45 mg/l almeno entro il limite superiore del campo esplorato.

Pertanto sembra che lo ione Na^+ comporti un certo vantaggio sulla stabilità a riposo della sospensione ma non oapporti benefici sensibili sulla viscosità e sulla tissotropia quando presente in combinazione con gli altri ioni.

Figura 7: Elaborazione grafica effetti del chimismo sulla tissotropia del CWF –

a) Aggiunta singoli sali

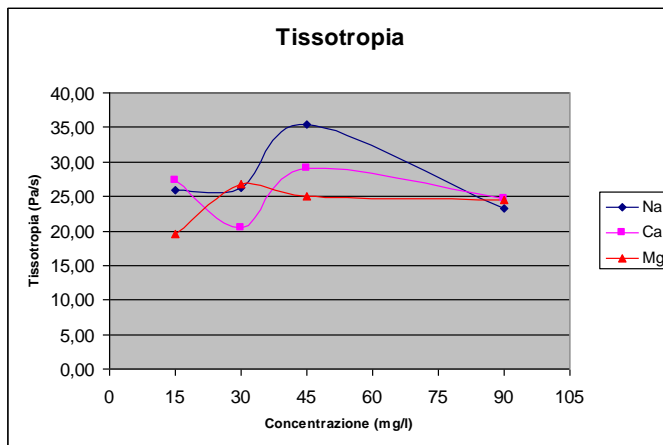
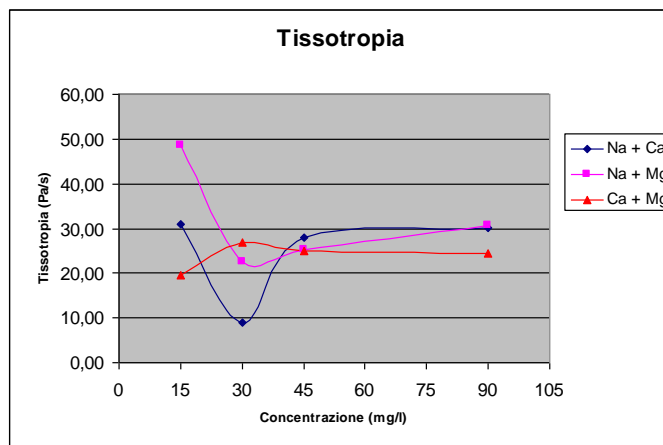


Figura 7 bis : Elaborazione grafica effetti del chimismo sulla tissotropia del CWF –

b) Aggiunta sali accoppiati

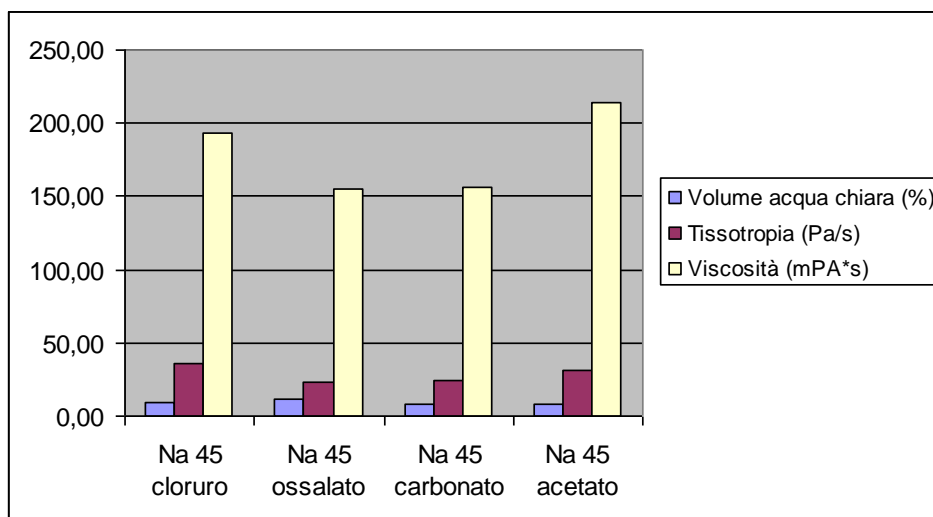


Tutte le prove finora descritte sono state effettuate con l'aggiunta di cloruri. È stata effettuata una prima analisi preliminare al fine di verificare l'influenza dell'aggiunta di altri sali degli stessi elementi anche se la letteratura indica una scarsa influenza degli anioni quando le particelle solide presentano una carica superficiale negativa come nel caso dei carboni.

.Questa nuova serie di prove è stata effettuata con l'elemento sodio aggiunto all'acqua distillata oltre che come cloruro anche come ossalato, acetato e bicarbonato con dosaggio di 45 mg/l.

La figura 8 mostra una piccola variazione dei parametri reologici e di stabilità al variare del tipo di sale utilizzato. In particolare si può notare come l'ossalato e il bicarbonato producano fluidi meno viscosi e meno stabili del cloruro e dell'acetato di sodio. Le soluzioni dei sali di sodio sono state preparate mantenendo il contenuto di ione sodio nell'acqua pari alla concentrazione di 45 mg/l confrontabile con le analoghe prove con cloruri.

Figura 8. Confronto tra diversi sali di sodio



2.3.2. Primi studi sugli effetti dell'aggiunta di soda e calce al CWF

Al fine di verificare la possibilità di utilizzare composti a basso costo come il carbonato di sodio e la calce spenta (Idrossido di Calcio) è stata effettuata una prima batteria di prove consistente in 6 campioni le cui caratteristiche sono illustrate in tabella 7.

I risultati sperimentali ottenuti senza ricorso a additivi stabilizzanti o fluidificanti consentono di fare alcune considerazioni interessanti:

- La stabilità non varia sensibilmente al crescere del dosaggio
- si osservano invece cambiamenti significativi per quanto concerne la tissotropia che quasi si dimezza nella prova SL3 per poi recuperare progressivamente sul valore iniziale all'aumentare del dosaggio oltre il punto di minimo;
- Anche le viscosità segue un andamento simile a quello della tissotropia presentando un minimo in corrispondenza allo stesso dosaggio ma poi subendo una tendenza crescente ancora più marcata
- Con riferimento al diagramma di figura 9 (da confrontare con quello di figura 8 seppure relativi a prove con concentrazioni diverse) si osserva che l'aggiunta di soda e calce all'acqua distillata in

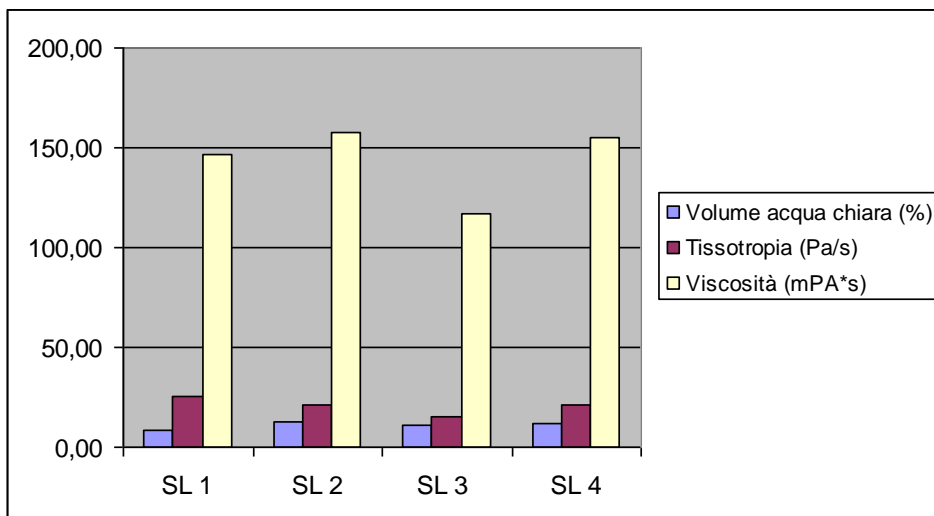
assenza di altri additivi produce risultati interessanti almeno per quanto riguarda la viscosità che si mantiene sotto i 150 mPas (superato leggermente solo nella prova SL2) contro valori intorno a 200 mPas in quasi tutte le altre prove pur non impiegando i costosi additivi stabilizzante e fluidificante.

Questo aspetti merita lo sviluppo di indagini più approfondite.

Tabella 7: Quadro di riepilogo della batteria di prova con aggiunta di soda e calce

Nome del campione	Concentrazioni (g/kg carbone)	Vol H ₂ O chiara [%]	Tissotropia [Pa/s]	Viscosità [mPa*s]
SL1	Soda 0,1170 Calce 0,3060	8,89	25,43	146,67
SL2	Soda 0,0585 Calce 0,1530	12,34	20,82	158
SL3	Soda 0,2340 Calce 0,6120	11,06	14,84	117,34
SL4	Soda 0,3510 Calce 0,9180	11,82	21,54	154,67
S1	Soda 0,1170	10,4	21,45	158,33
L1	Calce 0,3060	9,6	25,26	181

Figura 9 Confronto tra diversi campioni con aggiunta variabile di soda e calce



3. Studio della fattibilità economica del trasporto del carbone dalla miniera di Nuraxi Figus alla centrale di Portovesme per mezzo di una pipeline. Cenni preliminari.

3.1 Note generali

Il trasporto di miscele acqua carbone per mezzo di pipeline è una soluzione molto interessante in numerose applicazioni industriali, dalla combustione ai processi di gassificazione del carbone.

Il comportamento reologico di un C.W.S. a basse velocità di taglio può essere ragionevolmente descritto dal modello di Bingham attraverso la relazione (valida per in flussi laminari e con geometria semplice)

$$(\tau - \tau_0)_+ = \eta_B \dot{\gamma},$$

dove τ , τ_0 , η_B , e $\dot{\gamma}$ indicano rispettivamente lo sforzo di taglio, il campo di stress, la viscosità plastica e la velocità di taglio. Si tratta di un modello semplificato sufficiente per descrivere il sistema (Rosso). Il trasporto degli slurry di carbone può essere compiuto oltre che per mezzo di pipelines dedicate, in vari altri modi che vanno da quello su gomma e rotaia fino a quello via mare.

Il trasporto degli slurry di carbone può essere compiuto oltre che per mezzo di pipeline dedicate, in vari altri modi alternativi che vanno da quello su gomma e rotaia fino a quello via mare.

Storicamente gli schemi di trasporto dei CWS hanno riscosso grande interesse e sono stati studiati e sviluppati in particolare in quei paesi dove questo combustibile è più abbondante. In questi sistemi un aspetto critico è rappresentato dalla stabilità degli slurry che deve essere rafforzata per minimizzare fenomeni di sedimentazione durante il trasporto.

Quando la tecnologia operativa scelta non permette il loro utilizzo diretto, gli slurry vengono deacquificati per massimizzare l'efficienza energetica e il rapporto costi-benefici del trasporto. La fase di deacquificazione è una fase importante nei sistemi che la prevedono. Infatti se l'impianto prevede l'uso del carbone secco, l'acqua deve essere rimossa.

Progettare questa fase è un impegno delicato che si basa su numerosi fattori e criteri. Tra questi si possono citare la dimensione e la distribuzione granulometrica, il contenuto d'acqua iniziale, la reologia della miscela, la degradazione, l'uso finale e il riuso dell'acqua recuperata per altri utilizzi.

A livello operativo la fase di deacquificazione può essere effettuata mediante filtropresse, centrifughe e griglie. Poiché l'efficienza della operazione è funzione della distribuzione granulometrica è consigliata una vagliatura preliminare. Lenninger et al.(1978) hanno definito il

legame tra le caratteristiche granulometriche del carbone nella miscela e le operazioni di disidratazione.

A volte l'uso finale dello slurry di carbone è quello di caricare una nave destinata all'esportazione dello stesso. Naturalmente questo può succedere solo per i grandi produttori di carbone. In quest'ultimo caso si può anche fare ricorso a condotte sottomarine.

I sistemi di pipeline per il trasporto del carbone sono stati sviluppati in maniera costante a partire dagli anni '50 del secolo scorso. Essi possono essere suddivisi in 4 famiglie principali (Lee 2007):

1. Sistemi convenzionali a carbone fine
2. Sistemi convenzionali a carbone grosso
3. CWM (Coal Water Mixture)
4. Flussi stabilizzati di carbone

Questi sistemi differiscono per la dimensione granulometrica delle particelle di carbone nello slurry, come mostrato in tabella 8 (da Lee 2007).

Tabella 8: Granulometria e contenuto di carbone nei sistemi di trasporto in condotta del carbone

Granulometria e contenuto in carbone dei principali sistemi di trasporto in condotta del carbone		
	Granulometria	Contenuto di carbone
<i>Sistemi convenzionali a carbone fine</i>	< 1mm	50 (via terra e crico navi) 75 (a bordo della nave)
<i>Sistemi convenzionali a carbone grosso</i>	50-150 mm	30–60 (piccole distanze via terra e carico navi) 90–92 (a bordo delle navi)
<i>CWM (Coal Water Mixtures)</i>	-30 -150 micron	70 (via terra) 85–90 (carico navi e a bordo delle navi)
<i>Flussi stabilizzati</i>	Meno di 0,2 mm (fini) Meno di 50 mm (grossi)	70–75 (via terra, a bordo delle navi e carico navi)

Negli USA sono stati costruiti solo due sistemi di pipeline alimentati con slurry di carbone fine. Una in Ohio, costruita nel 1957 e in attività per parecchi anni, in cui lo slurry viaggiava a velocità moderata e con un contenuto di carbone pari al 50% in peso. La seconda, più famosa, ancora oggi in attività è quella di Black Mesa in Arizona, costruita nel 1970 in cui il fluido viaggia alla velocità oraria di 4 – 6 miglia ed è ottimizzato per limitare al massimo l'erosione delle tubazioni e la sedimentazione lavorando con una percentuale di carbone del 50% circa.

Nei sistemi convenzionali a carbone grosso il tout venant di carbone è trasportato ad alta velocità in miscele che vanno dal 35% al 70% di solido a seconda della granulometria. In questi sistemi di trasporto in condotta il costo di preparazione della sospensione di carbone è minimo anche se bisogna considerare che si ha una grande necessità di energia per il trasporto del materiale a causa della velocità necessaria per mantenere il carbone in sospensione. Questo tipo di sistema è pertanto limitato a piccole distanze dove possono essere usate altre forme di trasporto più competitive.

Gli impianti a slurry di carbone a flusso stabilizzato usano particelle più piccole in combinazione con particelle più grossolane. In particolare le particelle fini sono < 0,2 mm e quelle grossolane < 50 mm (Hsu et al 1988). Questo sistema è utilizzato per garantire la stabilità della miscela nel trasporto a lunga distanza. Il carbone è alimentato nella miscela in percentuali intorno al 70%. Il carbone in pezzatura grossa è più facile da deacquificare rispetto a quello più fine.

Tra i sistemi mostrati nella tabella l'unico progettato per l'utilizzo delle miscele direttamente senza deacquificazione sono quelli definiti a CWM. Queste miscele possono essere direttamente iniettate in bruciatori e fornaci e sono caratterizzate da alte percentuali di carbone preparato con distribuzione granulometrica bimodale o multimodale e dimensioni granulometriche inferiori ai 200 mesh.

Tali tipologie di miscela, del medesimo tipo di quelle studiate in questo lavoro, prevedono l'uso di reattivi come stabilizzanti e disperdenti che devono intervenire sulla reologia delle stesse.

In base alla tipologia di slurry preparato, si hanno diversi schemi di trattamento alla fine della pipeline. Infatti, come detto, solo gli impianti a CWM prevedono l'utilizzo diretto, le altre tipologie devono essere necessariamente deacquificate e trattate per conferire il carbone alla centrale nelle corrette specifiche operative.

Esempi di schemi di impianto sono mostrati in figura 10 e 11 .

Figura 10 Schema di trasporto e utilizzo del coal water (From Hsu, B.D., Leonard, G.L., and Johnson, R.N., *J. Eng. Gas Turbines Power*, 110, 516–520, July 1988.)

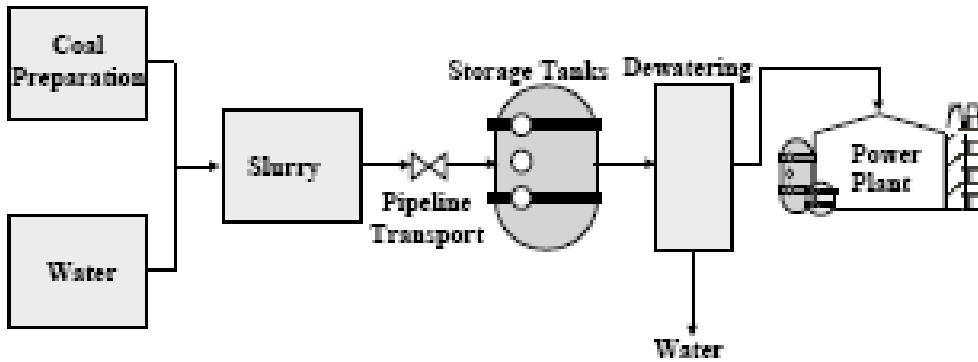
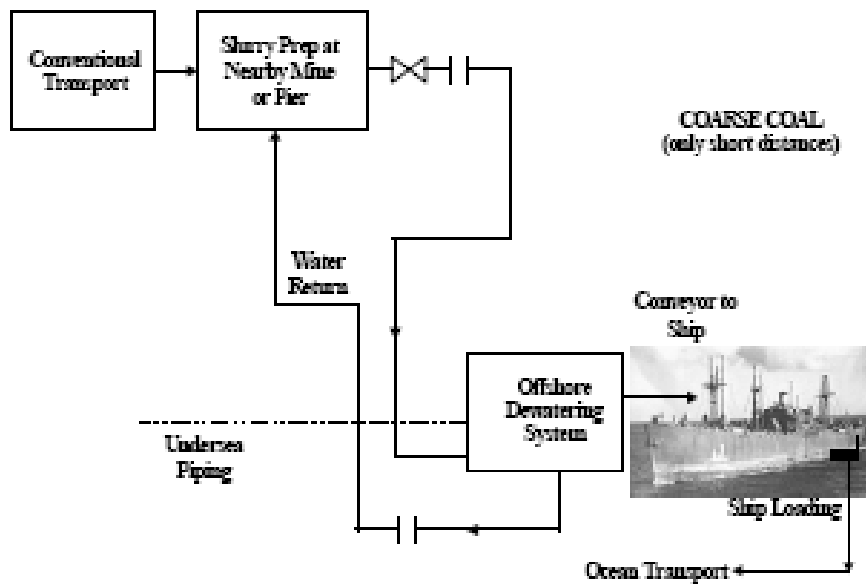


Figura 11: Schema di trasporto e utilizzo del coal water con disidratazione (From Hsu, B.D., Leonard, G.L., and Johnson, R.N., *J. Eng. Gas Turbines Power*, 110, 516–520, July 1988.)



Il contenuto di carbone in uno slurry varia a seconda della funzione a cui è destinato (tabella 9 elaborata da Hsu et al). La scelta del sistema di trasporto del carbone varia da caso a caso ed è funzione della distanza e del tipo di carbone in particolare, così come le caratteristiche di impianto. Ad esempio Black Mesa trasporta carbone per circa 440 km in tubazioni di 457 mm di diametro.

Una griglia è stata proposta da Hsu et al nel 1988 ed è utile per avere una idea generale del problema (Tabella 9).

Tabella 9: Selezione dei sistemi di trasporto in condotta del carbone (da Hsu et al 1988)

Selezione del sistema di trasporto in condotta del carbone ottimale			
	Caratteristiche del sistema		
Obiettivo	Lunghezza	Tipo	Scelta del sistema
<i>Rapido sviluppo</i>	< 5	Nazionale	Sistema convenzionale a carbone grosso
		Esportazione	Sistema convenzionale a carbone grosso
	50 -100	Nazionale	Sistema convenzionale a carbone fine
		Esportazione	Sistema convenzionale a carbone fine
	> 100	Nazionale	Sistema convenzionale a carbone fine
		Esportazione	Sistema convenzionale a carbone fine
<i>Bassi costi e ridotto uso di acqua</i>	< 5	Nazionale	Sistema convenzionale a carbone grosso
		Esportazione	Sistema convenzionale a carbone grosso
	50 -100	Nazionale	Flussi stabilizzati
		Esportazione	Flussi stabilizzati
	> 100	Nazionale	Flussi stabilizzati
		Esportazione	Flussi stabilizzati
<i>Utilizzo al posto dell'olio</i>	Tutte	Nazionale	CWM
		Esportazione	CWM

Un aspetto importante relativo al trasporto del carbone via pipeline è quello della degradazione. La degradazione del carbone durante il trasporto idraulico deve essere presa in considerazione quando si deve calcolare la perdita di pressione. La degradazione delle particelle si accentua quando ci sono numerose curve e valvole.

Shook et al. (1979) hanno effettuato analisi di laboratorio sulla degradazione del carbone durante il trasporto via pipeline. Tali studi hanno mostrato che:

4. La degradazione delle particelle è simile a processi di macinazione con mulini a sfere e a barre

5. Bisogna considerare un fattore di tempo nel corso del quale ci potrebbe essere una degradazione iniziale del carbone più friabile che decresce esponenzialmente con il tempo
6. La lignite degrada ad alte velocità dei miscelatori
7. Per il carbone bituminoso la degradazione è lineare con particelle relativamente piccola, ma è più bassa con le particelle più grossolane
8. La degradazione non è uniforme tra un rango e l'altro del carbone e può provocare una distribuzione bimodale di particelle

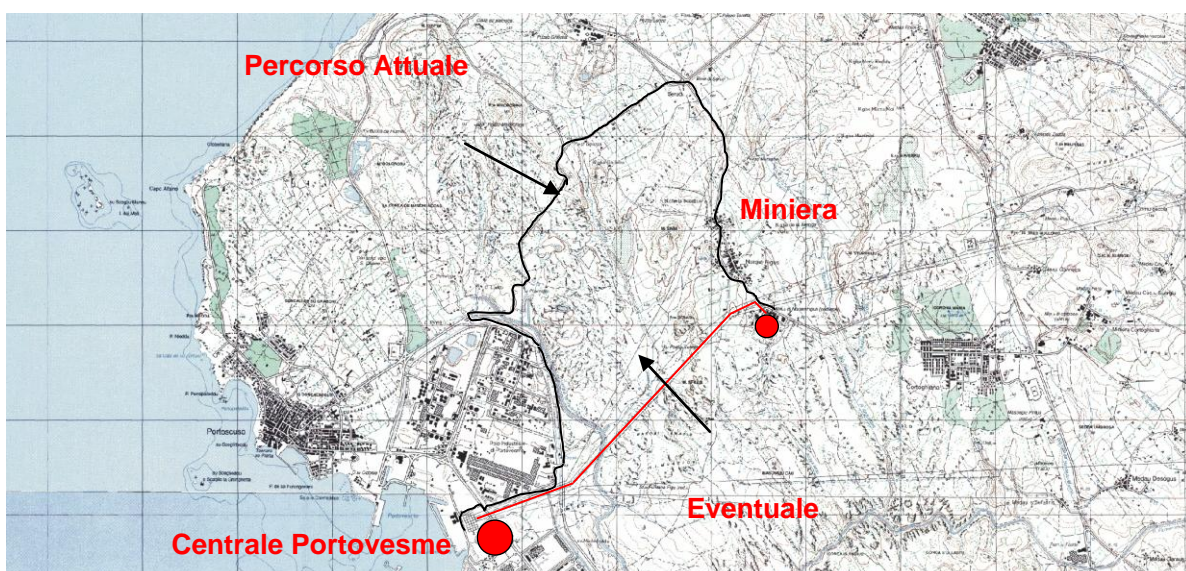
La degradazione di carbone in una pipeline è un fenomeno importante.

Anche la corrosione delle condotte è un aspetto da non trascurare nello studio delle pipelines di CWF a causa della presenza di zolfo nel carbone. Altrettanto importanti sono i fenomeni di sedimentazione (Rosso et al)

L'obiettivo del presente lavoro è quello di prevedere la possibilità economica e tecnica di utilizzo di CWM preparati con carbone Sulcis. Lo studio ha riguardato come mostrato nei precedenti paragrafi innanzitutto la reologia di queste miscele.

Scopo di questa sezione è quello di verificare anche le caratteristiche fluidodinamiche di queste miscele, valutandone quindi le perdite di pressione e il comportamento generale in condotta. L'obiettivo finale è quello di confrontare l'attuale tipologia di trasporto del carbone Sulcis, che avviene via terra mediante mezzi pesanti.

Figura 3: Rappresentazione grafica dei percorsi alternativi per il trasporto del carbone alla centrale elettrica



Nella immagine di figura 12 sono mostrati due itinerari. Il primo, denominato percorso attuale, più lungo (circa 12 km) è quello percorso dai camion che approvvigionano il carbone per la centrale di Portovesme presso i carbonili della Carbosulcis, il secondo, più breve (circa 3 km), ipotizza il tragitto di un'eventuale pipeline che trasporti il carbone in forma di CWF dall'impianto di trattamento di Carbosulcis fino alla medesima centrale.

Occorre valutare in via almeno preliminare i costi e i benefici della costruzione di tale tipologia di pipeline e il confronto con l'attuale forma di trasporto via terra. In passato alcune ricerche, peraltro molto datate, sconsigliavano l'adozione della pipeline per piccole distanze, essendo molto più convenienti altre forme di trasporto.

Infatti si considerava che il trasporto via pipeline necessitasse di alcune condizioni di base come ad esempio, oltre alla distanza, le caratteristiche favorevoli del terreno, la necessità di avere grandi produzioni di carbone da trasportare, la mancanza di canali navigabili prossimi territorialmente, disponibilità d'acqua a costi contenuti e altri parametri di natura economica (A technology assessment of coal slurry pipeline – United States Congress – Office of Technology Assessment 1978).

Molti di questi studi ignoravano le evoluzioni della tecnologia nel campo dei bruciatori per CWF e soprattutto l'incidenza dei costi sociali ed ambientali nei bilanci di costo che mettevano a confronto le varie tipologie di trasporto. Per effettuare una corretta analisi tecnica ed economica si devono conoscere i parametri fondamentali del sistema.

Il primo aspetto che si vuole indagare è la pompabilità di miscele CWM preparate con il carbone Sulcis valutata sulla base dello studio della perdita di pressione di questo fluido combustibile in determinate condizioni di trasporto in condotta. Per questo è stato progettato un sistema di misurazione della caduta di pressione che verrà illustrato nel prossimo paragrafo. Questo studio può fornire i primi elementi per una analisi più generale che compari i vantaggi e gli svantaggi del trasporto di questi CWM:

3.2 Prove di laboratorio

È stata incentrata l'attenzione sulle caratteristiche fluidodinamiche del CWF durante il trasporto, in condotta, con particolare attenzione alla caduta di pressione perché questo parametro è un elemento assai importante per la progettazione ottimale dei sistemi di pompaggio e la minimizzazione del consumo di energia.

Innanzitutto occorre sottolineare come questi slurry vengono confezionati con percentuali di carbone prossime alla loro densità di "packing". In letteratura ci sono numerosi studi riguardanti il pompaggio dei CWF in condotta specie da parte della scuola cinese, data la grande disponibilità di

materia prima da parte del colosso asiatico associata alle distanze tra i luoghi di estrazione e di utilizzo del combustibile.

Uno dei fenomeni che può influenzare questi aspetti è il cosiddetto “wall slip”, che avviene quando all'interfaccia tra lo slurry e il bordo della condotta lo sforzo di taglio aumenta determinando una forte caduta di pressione.¹

La spiegazione comune del “wall slip” è che in flussi con alta concentrazione in solido come il CWF si crea vicino alla parete un sottile strato molto fluido in cui la concentrazione locale di solido e la viscosità sono molto inferiori rispetto al fluido lontano dalla parete. Si crea allora un gradiente di velocità tra queste due regioni che provoca un apparente slittamento del fluido più denso. Si tratta di un fenomeno importante perché, come dimostrato da numerosi studi, non considerarlo porta a sottostimare la viscosità e il gradiente di pressione. Si tratta di uno dei possibili fenomeni che possono verificarsi durante il flusso di un CWF in una condotta. Altri sono presenti in letteratura e ad essi si rimanda.

3.3 Apparato sperimentale

Al fine di esprimere una prima valutazione della pompabilità dei CWF prodotti col carbone Sulcis e definire anche i parametri per la progettazione della pipeline utili anche per la stima dei costi (inclusi quelli relativi alle modifiche da effettuare in centrale per le operazioni di shifting da polverino di carbone a CWF) si è provveduto alla realizzazione di un'apposita attrezzatura di laboratorio.

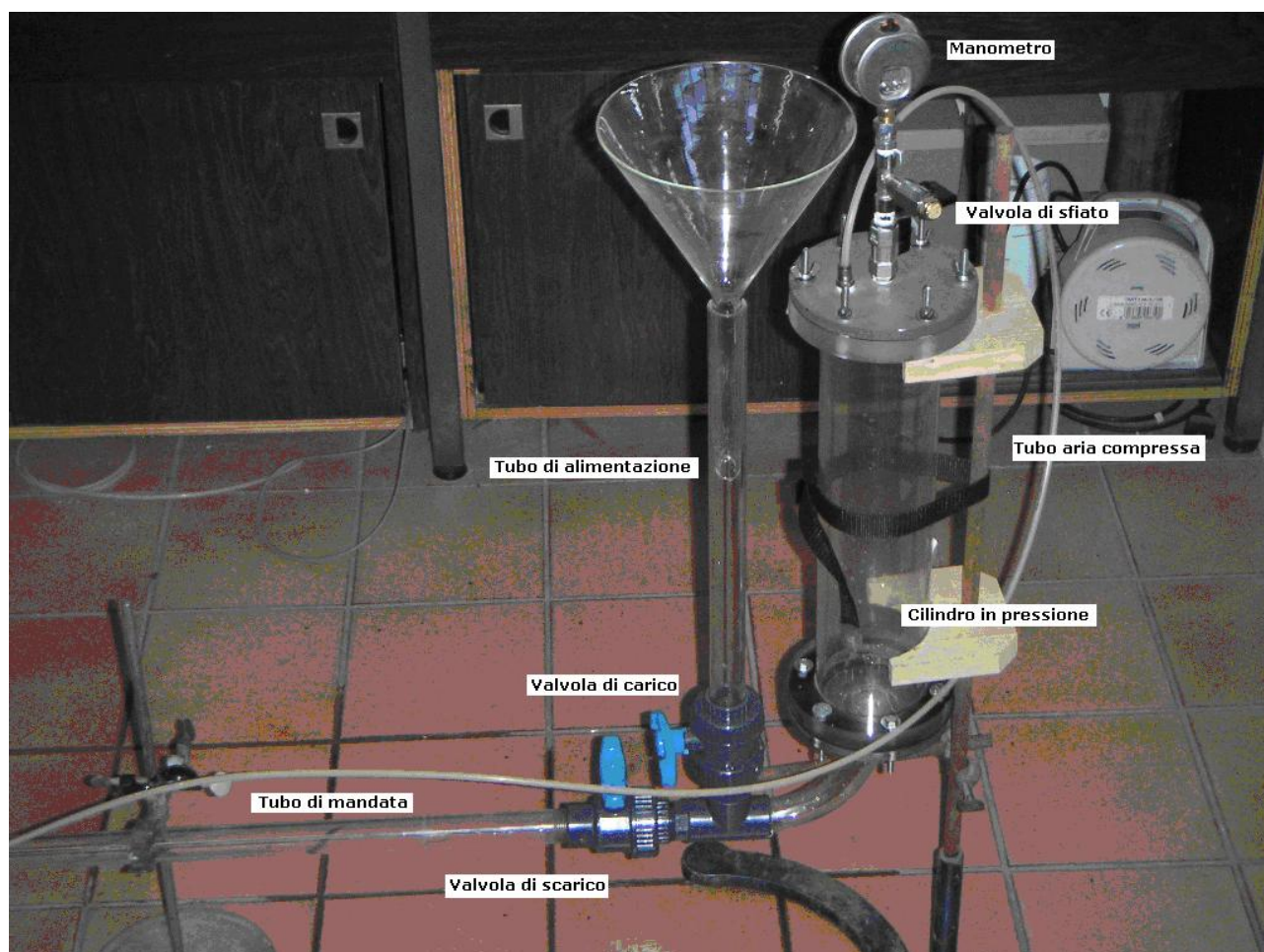
Come mostrato in figura 13 l'attrezzatura consiste in un serbatoio cilindrico entro il quale viene immesso un quantitativo noto di miscela attraverso il tubo di alimentazione comunicante con il cilindro stesso a pressione atmosferica tramite la valvola di carico mantenuta aperta. Il CWF riempie il cilindro per il principio dei vasi comunicanti fino a portarsi su un livello predeterminato.

Completata l'operazione di alimentazione, viene chiusa la valvola di carico a immessa aria compressa alla pressione voluta. Quindi viene aperta la valvola di scarico e la miscela defluisce attraverso il tubo di mandata sotto la spinta della pressione applicata.

Trascorso il tempo necessario perché il pelo libero della sospensione nel cilindro si porti al livello inferiore assegnato, corrispondente all'erogazione di un volume V di CWF (1 litro) si ricava la portata e, nota la sezione del tubo di mandata, si determina la velocità di deflusso

¹ **Slip flow of coal water slurries in pipelines** Liangyong Chen, Yufeng Duan *, Meng Liu, Changsui Zhao School of Energy and Environment, Southeast University, No. 2 Si Pai Lou, Nanjing 210096, China

Figura 4: Apparato sperimentale per la determinazione dei parametri di pompabilità



3.4. Risultati ottenuti

L'esperimento consente di costruire la curva pressione/portata e di calcolare le perdite di carico lungo la tubazione di mandata di lunghezza nota.

I risultati ottenuti sono rappresentati nella tabella 10 e nel grafico di figura 14.

La densità della sospensione allo scarico può calcolarsi determinando il peso scaricato con bilancia di precisione sulla quale è collocato il recipiente di raccolta. Un eventuale valore minore della densità rispetto a quello noto della sospensione di partenza è indicativo di fenomeni di sedimentazione lungo il tubo di mandata.

Tabella 10: Quadro riassuntivo dei risultati delle prove di pompabilità del CWF.

Figura 14: Curva pressione/ portata nelle prove di pompabilità del CWF con il carbone Sulcis

4. La cella Hydrojet per la concentrazione del carbone da destinare alla produzione di CWF

4.1 Stato dell'arte nella tecnica di flottazione

La tecnologia water jet, già molto diffusa soprattutto nel campo del taglio delle rocce ornamentali, ha però numerose altre applicazioni in campo ambientale e minerario e tra le tecnologie utilizzate per il trattamento del carbone.

In questo senso si possono citare gli esperimenti effettuati con risultati incoraggianti presso i laboratori del DIGITA relativi all'agglomerazione in olio del carbone e l'applicazione di fetti d'acqua a granulatori di concezione tradizionale per aumentarne la capacità di trattamento (Hera Machine). Nel campo della comminuzione fine e della micronizzazione dei minerali sono in fase di sviluppo tecniche di macinazione basate sull'utilizzo di getti d'acqua contrapposti che potrebbero rivestire grande interesse ai fini della preparazione dei CWF.

Tra queste tecnologie innovative che sfruttano i getti d'acqua assume un ruolo interessante quella relativa alla cella Hydrojet per la flottazione del carbone.

La flottazione è un processo chimico fisico che sfrutta l'adesione selettiva delle bolle d'aria ai solidi con comportamento idrofobico (naturale o indotto) e contemporaneamente l'adesione dei dipoli d'acqua a quelli idrofilici che rimangono dispersi nella torbida.

Il processo è legato ai fenomeni che avvengono all'interfaccia solido-liquido, solido-gas e liquido-gas. La condizione ottimale per la flottazione del carbone è che la particella di solido, immersa in acqua, possa aderire alle bolle d'aria ed essere portata in superficie producendo un concentrato mentre il materiale non flottabile viene eliminato allo scarico.

Per conferire caratteristiche di idrofobicità e migliorare la tendenza del carbone ad aderire alle bolle d'aria si usano dei reagenti specifici, i collettori, che hanno il compito di formare un film superficiale sulla superficie delle particelle che in questo modo vengono catturate dalle bolle d'aria mentre la bagnabilità delle particelle sterili viene controllata per mezzo di agenti disperdenti che le rendono non adatte all'adesione con le bolle.

Altre tipologie di reagenti utilizzati sono gli schiumatori, che servono a stabilizzare le schiume mineralizzate che si formano quando le bolle d'aria raggiungono la superficie, e gli agenti modulanti che servono per modificare alcune caratteristiche della torbida di flottazione utili per far funzionare meglio il processo, come il pH.

I collettori più usati per la flottazione del carbone sono i collettori non polari derivanti dalla distillazione del petrolio come il cherosene e il gasolio. Gli schiumatori più utilizzati sono l' MIBC (MetilIsoButilCarbinolo), il Dowfroth e l'olio di pino. Le macchine dove avvengono questi fenomeni

di separazione sono le cosiddette celle di flottazione nelle quali si ha l'agitazione e l'aerazione della torbida con procedimenti di tipo meccanico o pneumatico.

4.1.1 Problemi relativi alla tecnologia attuale

Questo processo ha trovato applicazione in numerosi altri campi oltre a quello della preparazione dei minerali come, ad esempio, la depurazione e la decontaminazione delle acque o l'eliminazione di materiali indesiderati dai metalli. Tuttavia, l'efficienza di questo processo è spesso limitata a un campo granulometrico piuttosto stretto che va dai 10 ai 100 micron (Tao 2005).

È ben noto il fatto che la performance di separazione delle macchine di flottazione diminuisce al decrescere della dimensione delle particelle; infatti quando si trattano materiali a granulometria molto fine si hanno bassi recuperi, scarsa qualità dei prodotti e alto consumo di energia specifica e di reagenti.

4.1.2 Caratteristica della popolazione di bolle

La formazione di bolle nella torbida è un aspetto fondamentale nello sviluppo di un processo di flottazione. L'efficienza di collezione aumenta se le bolle sono ben disperse nella cella, cioè, per un dato volume di aria iniettata, la dimensione delle bolle deve essere la più piccola possibile al momento della loro generazione, unendosi poi in bolle più grandi a causa della coalescenza dovuta all'upflit delle particelle di minerale attaccate. Dall'analisi delle condizioni che governano la dispersione delle bolle nelle celle di flottazione con agitazione meccanica è emerso che la loro dimensione media decresce se (Klassene Mokrousov 1963):

1. la tensione superficiale all'interfaccia liquido solido aumenta
2. viene raggiunta nel liquido una turbolenza più intensa
3. l'aria è inserita nella torbida ad alta velocità

Studi sull'effetto della fase gassosa hanno mostrato che in flottazione, come in altri processi che mettono in gioco gas e liquidi, la velocità di recupero del minerale è intimamente legata alla distribuzione dimensionale delle bolle nella cella di flottazione.

È universalmente riconosciuto che la collisione bolla-particella, l'attacco e il distacco, il collasso delle bolle, l'insufficiente azione di galleggiamento per particelle difficilmente flottabili e l'indesiderato draw meccanico dei limi di ganga sono gli aspetti più critici nel processo di flottazione.

Tutti questi aspetti richiedono un'attenta conoscenza e controllo dell'idrodinamica della cella di flottazione. Un approccio scientifico al problema consente di soddisfare il bisogno di progettare

celle di flottazione più grandi ed efficienti, in modo da trattare giacimenti di grado più basso e finemente disseminati che devono essere coltivati nel mondo.

4.1.3 Conoscenza disponibile

Molti ricercatori si sono occupati dei problemi concernenti la dimensione delle bolle dell'idrodinamica nelle celle di flottazione. Vi è un accordo generale sul fatto che lo scarso recupero in flottazione delle particelle molto fini è principalmente dovuto a una bassa probabilità di contatto bolla-particella, mentre la ragione principale per un basso recupero delle particelle più grosse è l'alta possibilità di distacco delle particelle dalla superficie delle bolle a causa della loro insufficiente portanza.

Analisi fondamentali evidenziano che l'uso di bolle più piccole è l'approccio più valido per incrementare la probabilità della collisione e ridurre la possibilità di distacco. (Tao 2005). La stessa riflessione è stata fatta da altri autori.

È stato sperimentalmente dimostrato che il grado di aerazione della torbida in forma di bolle piccole aumenta linearmente con la velocità relativa dei due fluidi interagenti (aria e acqua) mentre è inversamente proporzionale alla cosiddetta *elasticità capillare*, cioè al rapporto tra la tensione superficiale e il diametro delle bolle.

Mentre un abbassamento della tensione superficiale gioca un ruolo rilevante nel processo, d'altra parte è chiaro che, a parità di tensione superficiale, una buona dispersione dipende principalmente dalla frizione di taglio tra le due fasi liquida e gassosa cioè dal grado di turbolenza nella regione di formazione delle bolle.

L'ammontare della forza di frizione, strettamente legata al momento, è data dalla ben conosciuta equazione seguente:

$$F=AK(-\Delta V)^2$$

Dove:

- F è la forza di frizione
- A è la superficie di contatto
- K è una costante
- ΔV è la velocità di equilibrio data dalla differenza tra la velocità attuale di una delle fasi a un dato punto e che poteva essere raggiunta teoricamente sotto le medesime condizioni di flusso costante con le altre fasi (Loncin 1961).

Ulteriori conferme dell'importanza della distribuzione granulometrica delle bolle può essere trovata in uno studio relativo alle tecnologie di flottazione in colonna di un carbone dell'Illinois; la

generazione di bolle piccole può essere favorita aumentando la velocità di taglio del fluido nella zona di nucleazione delle bolle.

Nello stesso studio è stato sottolineato che l'aggiunta di grandi quantità di schiumatore per ridurre la dimensione delle bolle può essere deprimente per la selettività a causa dell'aumento del recupero di acqua dalla torbida alla schiuma. Tuttavia, riducendo la dimensione delle bolle aumentando la velocità di taglio potrebbe essere una buona scelta in termini di selettività, mentre potrebbe portare ad un aumento di consumo di energia specifica. (Honacker 1994).

I risultati raggiunti con la colonna di flottazione specialmente nel caso di particelle fini è dovuto al fatto che generatori di bolle esterni usati nelle colonne di flottazione producono bolle più piccole con un grado più alto di uniformità che le celle convenzionali.

Conseguentemente un significativo aumento nel tasso di recupero di carbone da una torbida può essere raggiunto attraverso un generale più grande quantità di superficie di bolle per una data velocità di aerazione, disponibile per la cattura di particelle flottabili.

4.1.4 Idrodinamica dei flussi multifase nella cella

Sono stati sviluppati differenti concetti con l'obiettivo di migliorare le possibilità di attacco bolla particella. Per esempio un approccio utilizza una completa colonna di schiuma.; altre tecniche utilizzano ad esempio deflettori per ridurre la turbolenza, riducendo in questo modo la probabilità che una particella passi senza contatto con la bolla.

L'uso di aria autoindotta e la generazione di microbolle uniformi sono nuovi concetti di altre tecniche di flottazione in colonna. Ahmed e Jameson hanno segnalato un incremento di quasi cento colte nella velocità di flottazione del quarzo fine quando la dimensione media delle bolle nella loro cella di flottazione era ridotta da 655 a 75 micron; Yoon e Luttrell hanno mostrato teoricamente che la probabilità di contatto tra particelle e bolle nella flottazione varia con l'inverso della dimensione delle bolle.

Più recentemente Gorain et al hanno osservato una relazione lineare tra la costante di velocità di flottazione del primo ordine e il flusso superficiale della bolla in una cella di flottazione ad agitazione meccanica suggerendo che questo parametro può essere usato per caratterizzare il contributo fisico della cella di flottazione alla velocità di recupero di minerale.

Un'ovvia conseguenza di ogni tentativo di aumentare la probabilità di contatto tra bolla e particella è che il tempo di permanenza richiesto per raggiungere un alto recupero decresce di circa due o tre volte, come nel caso della cella di Jameson. Un ulteriore capacità di carico delle schiume in tonnellate/ora di prodotto aumenta di conseguenza. (Honacker 1994).

4.1.5 Modelli dei processi di flottazione

Da quanto detto sinora emerge che lo studio più attento delle caratteristiche delle bolle è di primaria importanza per l'ottimizzazione del processo di flottazione. Per questo sono stati finora proposti numerosi modelli.

Tuttavia il tradizionale approccio alla modellizzazione di dispersione del gas nelle celle meccaniche non ha coinvolto le microproprietà come la distribuzione granulometrica delle bolle, ma ha piuttosto affrontato le tematiche relative alle caratteristiche macroscopiche del sistema.

Un più sofisticato tentativo di descrivere il bilancio della popolazione di bolle nel dominio dello spazio e del tempo consente di prevedere i diametri medi di Sauter delle bolle in una cella di flottazione in cui sono trattate come due zone separate, statisticamente omogenee: la zona di agitazione e la zona di deposito di massa (Sawyer 1998).

Le funzioni di bilancio per i tassi di rottura delle bolle, la coalescenza, la ricircolazione e gli eventi inlet e outlet sono proposti basati sulla ingegneria chimica classica su sistemi misti di due o tre fasi. L'affidabilità dei modelli matematici può essere meglio assicurata con l'assistenza di osservazioni tecniche capaci di misurare accuratamente un numero elevato di bolle.

La tecnica consiste nell'esporre un flusso di bolle alla scansione progressiva con fotocamera, usata per studiare l'effetto di numerose variabili chimiche e fisiche della dimensione delle bolle agenti in una cella di flottazione in scala di laboratorio. (Grau 2006)

4.1.6 Effetto della turbolenza

I risultati sperimentali di una ricerca che aveva l'obiettivo di purificare l'alluminio fuso hanno indicato che la turbolenza può aumentare la velocità di flottazione di inclusioni non metalliche alle bolle. Sono stati investigati possibili fenomeni responsabili di questi risultati.

Solo i vortici più piccoli contribuiscono ad aumentare la deposizione turbolenta delle inclusioni mentre i vortici più grandi del diametro delle bolle possono solo spostare le bolle. La dimensione delle bolle e le condizioni di collezione possono cambiare considerevolmente con la velocità del rotore. La turbolenza può aumentare l'efficienza di collezione più di dieci volte rispetto alle condizioni di moto laminare. (Gammelseter et al 1997).

Le condizioni idrodinamiche prevalenti nella cella di flottazione possono essere modificate principalmente aumentando la velocità dell'agitatore e le condizioni di aerazione oppure attraverso la concentrazione di schiumatore.

La velocità di aerazione ha un impatto profondo nella generazione delle bolle; la dimensione delle bolle aumenta con l'aumento del flusso di aria che entra nella cella. La velocità di aerazione sembra influenzare la dimensione, la forma e il comportamento delle cavità aerate formate dietro le palette del rotore della cella. L'US Bureau of Mines ha esaminato l'influenza della turbolenza

nella flottazione con bolle piccole di particelle fini di galena in modo da migliorare l'efficienza di flottazione. È stata trovata una risposta positiva della flottazione ad alta agitazione mentre l'influenza della dimensione delle bolle era piccola. Questi risultati hanno mostrato la risposta dei predetti modelli per la flottazione di particelle fini. (Spears and Jordan 1989).

4.1.7 Effetto dell'aggiunta di schiumatori

Con l'aumento della concentrazione di schiumatore il grado di coalescenza delle bolle decresce mentre ad una particolare concentrazione di schiumatore conosciuta come "Concentrazione Critica di Coalescenza" (CCC), la coalescenza delle bolle è ostacolata totalmente. I risultati sperimentali indicano anche che gli schiumatori sembrano avere effetti sul meccanismo di rottura delle bolle. (Grau 2006).

Al di sotto della concentrazione di coalescenza critica la dimensione delle bolle non è determinata dalla coalescenza ma dipende dalla geometria degli sparger e dalle condizioni idrodinamiche. I risultati mostrano che la probabilità di collezione aumenta rapidamente con la diminuzione della dimensione delle bolle e il valore è in accordo con le probabilità di collezione teoricamente predetta dall'analisi di Weber e Paddock (Yoon e Luttrell 1989).

La coalescenza può essere prevenuta a una concentrazione di schiumatore che eccede la CC. Test di schiumabilità hanno indicato che la stabilità delle schiume sotto condizioni dinamiche sono determinate dalla coalescenza delle bolle. (Cho e Laskowsky 2002). La dimensione delle bolle in una cella di flottazione è un risultato di diversi processi: la coalescenza delle bolle e adsorbimento dello schiumatore sulla loro superficie.

La formazione di un interfaccia iniziale dovuto alla rottura della fase gas è una condizione indispensabile per stabilizzare la dimensione delle bolle a valori più bassi (Kondratev e Bochkarev 1998).

4.1.8 Comprensione del meccanismo coinvolto in flottazione

Il meccanismo di base della dispersione del gas sotto condizioni altamente turbolente è stato trattato da numerosi ricercatori. In celle agitate meccanicamente, aerate come quelle di flottazione l'aria è introdotta nella cella si accumula in cavità sotto pressione dietro l'agitatore e le bolle sono allontanate dalle cavità dalla rotazione dell'agitatore (Tattersson 1991).

Queste bolle sono ulteriormente rotte sotto condizioni di turbolenza nella regione di agitazione e sono quindi disperse attraverso la cella dall'azione di pompaggio dell'agitatore. Nelle zone superiori della cella, il movimento delle bolle è controllato dal movimento del fluido circostante e dalla galleggiabilità inerente delle bolle.

Le bolle in questa regione possono collidere e coalescere, o ricircolare dietro la regione di agitazione o fuoriuscire dalla cella. L'equilibrio della distribuzione delle bolle nella cella è dettato da

tutti gli eventi che accadono nella cella in particolare dalle velocità relative di rottura delle bolle e dalla coalescenza delle bolle nella cella.

Studi relativi alla coalescenza delle bolle riportati in letteratura hanno isolato il tasso di coalescenza eliminando il contributo della rottura delle bolle sulla distribuzione dimensionale di equilibrio delle bolle. Questo è stato fatto sia impiegando colonne di bolle molto quiescenti dove il tasso di rottura era trascurabile, sia diffondendo le bolle nel sistema che erano molto piccole per essere rotte dall'agitatore.

È evidente che sia la coalescenza che la rottura sono complessi, fenomeni interdipendenti che sono influenzati dallo stato del sistema. Nel sistema come una cella di flottazione meccanica dove la coalescenza e la rottura avvengono contemporaneamente.

4.2 Potenzialità della tecnologia waterjet sulla flottazione

4.2.1 Punto di partenza della ricerca

Come già accennato in precedenza sono stati ottenuti scarsi risultati nel trattamento dei finissimi usando metodi convenzionali. Le frazioni sotto 0,5 mm rappresentano spesso una parte consistente dell'alimentazione dell'impianto di trattamento, perciò lo sviluppo di tecniche atte al loro recupero possono dare un notevole contributo al bilancio economico di un processo di arricchimento di un minerale.

La flottazione in schiuma può essere considerata una delle tecniche più attrattive in questo senso per il trattamento dei limi. Per creare le condizioni più favorevoli al miglioramento delle condizioni di sviluppo di meccanismi di collezione e separazione, è stato sviluppato un nuovo approccio basato sull'agitazione della torbida per mezzo di getti d'acqua ad alta velocità generati attraverso ugelli di configurazione opportuna (Carbini et al, 1996, 1998, Chudaceck et al 1997).

Nelle celle convenzionali ad agitazione meccanica sono usati degli agitatori per creare le condizioni per raggiungere la più alta velocità differenziale tra il liquido e la fase gassosa aumentando l'aerazione della torbida. La velocità differenziale è quella raggiunta alla periferia del rotore tra l'aria in ingresso e lo strato di acqua agitata.

Tuttavia nonostante si utilizzano dispositivi adatti come uno statore frontale con l'obiettivo di incrementare l'effetto, la velocità differenziale comunemente raggiunta nelle celle meccaniche non supera qualche metro per secondo. In base a queste considerazioni la possibilità di applicare un differente concetto per incrementare sostanzialmente la velocità differenziale era un'intrigante possibilità da investigare.

L'efficienza di collezione aumenta se le bolle sono ben disperse nella cella cioè che, per un dato volume di aria iniettata, la dimensione delle bolle dovrebbe essere più piccola possibile al momento della loro generazione.

Dunque la coalescenza in grandi bolle può assicurare una maggiore portanza evitando fenomeni di rottura dovuti all'assottigliamento del film di interfaccia. A tal fine le possibilità offerte dal water jet è sembrata molto interessante sotto i seguenti aspetti

1. Possibilità di generare correnti d'acqua ad alta velocità, almeno un ordine di grandezza più alto di quello raggiunto con agitazione meccanica, a pressioni relativamente basse;
2. Alta turbolenza nella cella grazie alla possibilità di creare un numero di vortici sovrapposti modificando opportunamente la geometria degli ugelli;
3. Bolle iniziali più piccole generate da fori calibrati proprio sotto gli ugelli del water jet;
4. Distribuzione delle bolle nella cella.

I getti d'acqua ad alta velocità sono capaci di raggiungere una potenza considerevole (fino a centinaia di kW) concentrata in un piccolo spazio (meno di 1 mm). Quando questo fascio di energia è iniettato nella cella riempita con acqua la velocità di taglio può essere molto alta, almeno un ordine di grandezza superiore dipendente dai parametri idraulici (pressione e velocità di flusso).

4.2.2 Apparato da laboratorio

Un prototipo della cella di flottazione water jet, chiamata Hydrojet, è stata disegnata e costruita presso il DIGITA dell'Università di Cagliari e consiste in un recipiente cilindrico di circa 10 litri di volume fornito di una griglia inferiore emisferica per la scarica dei rifiuti attraverso un orifizio centrale. Le schiume sono eliminate attraverso uno scivolo nella sezione superiore del corpo cilindrico (Carbini et al, 1998).

L'efficienza del processo di flottazione dipende molto dall'iniziale contatto tra la bolla d'aria e la particella di minerale. Per incrementare questo contatto la geometria degli ugelli dentro la cella di flottazione è stata messa a punto per raggiungere un buon mix tra i solidi soospesi e l'aria dispersa.

Uno schema dell'impianto da laboratorio è mostrato in figura 14. Una foto del sistema è invece illustrata nella seguente figura 15.

Figura 14: Flowsheet dell'impianto di flottazione Hydrojet

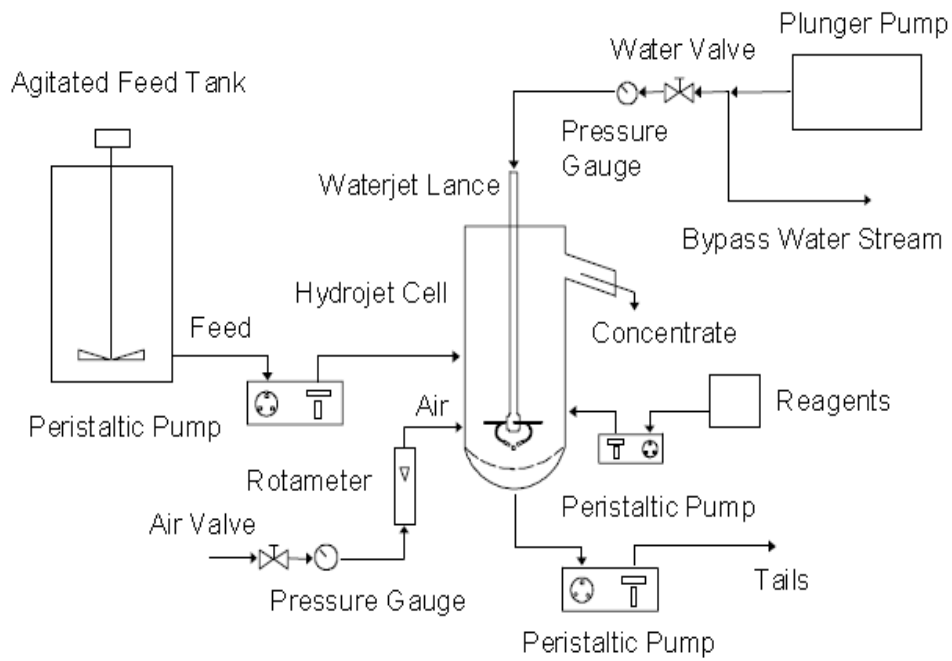
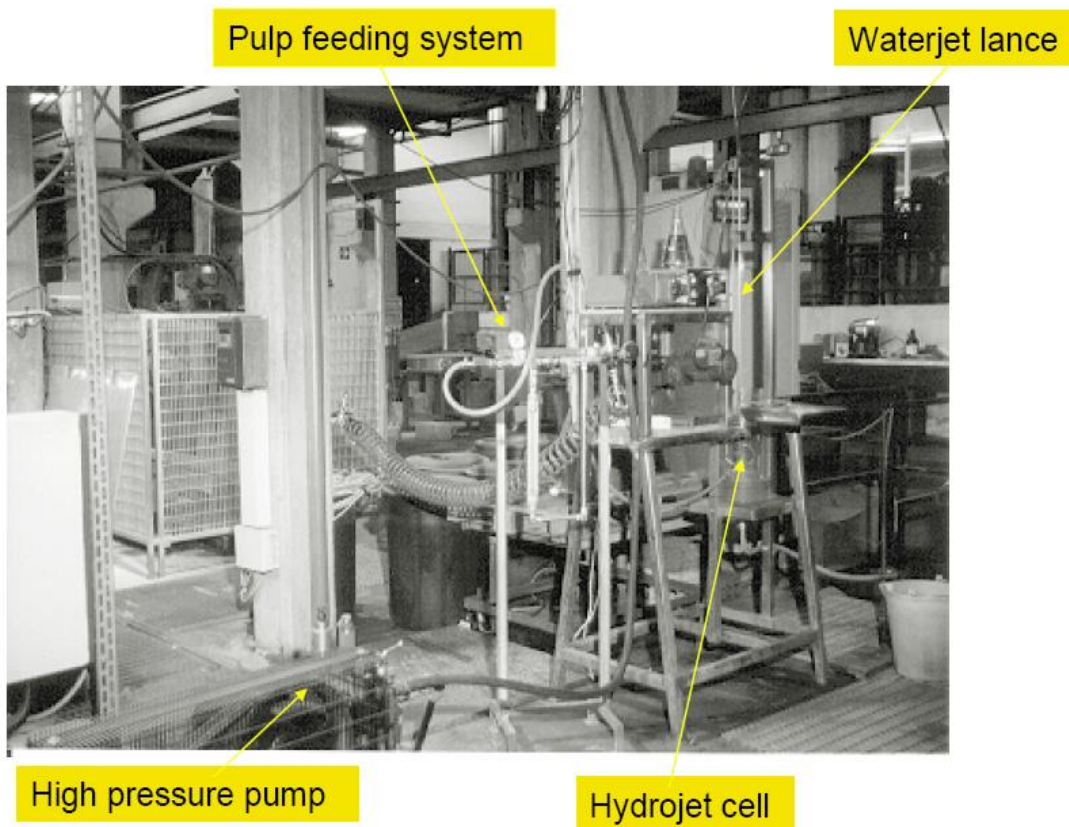


Figura 15: Laboratorio per la sperimentazione del sistema di flottazione Hydrojet o



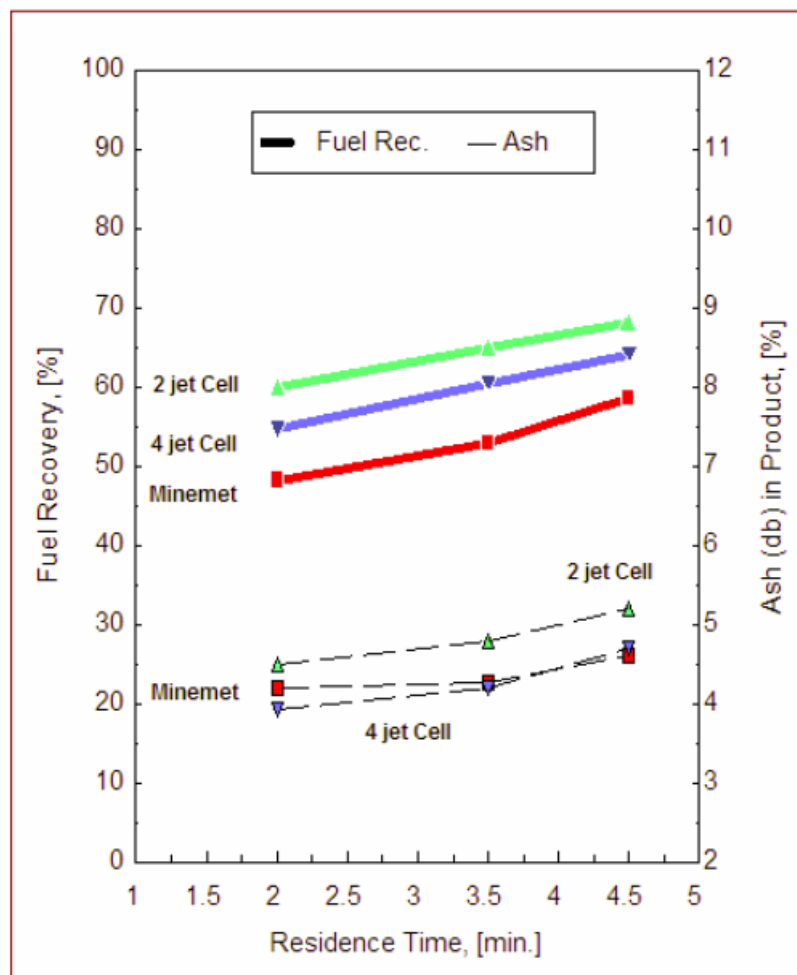
4.2.3 Risultati delle prove con la cella Hydrojet da laboratorio

Una serie di prove parallele di flottazione sono state effettuate con cella Hydrojet e con cella convenzionale, usando la stessa cella cilindrica sotto le medesime condizioni sperimentali per permettere il confronto dei risultati.

Le prove sperimentali sono state fatte su campioni di tout venant di carbone. È stato utilizzato un carbone di alto rango proveniente dalla miniera di Walsum (Germania), macinato a secco al di sotto di 0,3 mm.

La cinetica del processo con getto d'acqua o con agitazione meccanica è stata studiata variando la velocità di alimentazione dei solidi. I risultati tecnici (recupero di combustibile e qualità della separazione) sono funzione del tempo di permanenza e sono riassunti nella figura 16 seguente .

Figura 16: Recupero di combustibile e ceneri nei prodotti della flottazione del carbone Walsum effettuata con cella tradizionale e con celle Hydrojet



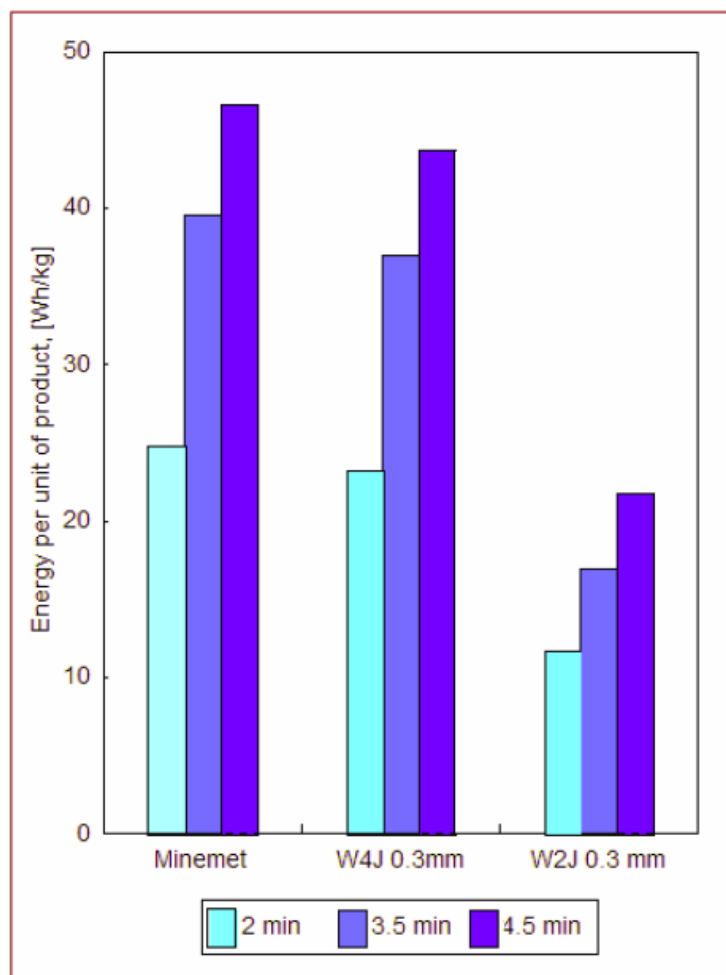
Il recupero con cella a getto d'acqua è notevolmente superiore a quella ottenuta con agitazione meccanica. I risultati sono migliori utilizzando solo due getti, anche se la qualità del prodotto è

leggermente peggiore. Per conseguire lo stesso recupero è necessario un tempo di permanenza 2,5 volte più lungo con la cella ad agitazione meccanica (Agus et Al., 1998).

Un ulteriore vantaggio offerto dalla cella con agitazione waterjet è una notevole riduzione del consumo di energia, come mostrato in figura 17, in cui è rappresentata l'energia specifica per kg di carbone recuperato con tempo di permanenza variabile.

Rispetto alla cella convenzionale, l'energia specifica con quattro getti da 0,3 millimetri è quasi la stessa, ma diventa meno della metà se sono usati solo due getti, che è la condizione migliore per la separazione.(Carbini et al 2007).

Figura 5 Consumo di energia specifica



4.2.4 Discussionione

Sulla base dei risultati delle prove sperimentali, le seguenti considerazioni possono essere tratte riguardo la spiegazione scientifica dei risultati osservati.

- Tipo di prodotto

La qualità dei prodotti flottati è sempre migliore quando viene utilizzato il getto d'acqua per l'agitazione e per la generazione delle bolle. Si ritiene che ciò sia dovuto alla distribuzione delle dimensioni delle bolle più favorevole (valore medio e dispersione).

Al fine di sostenere questa fatto in modo quantitativo sarebbe necessario per misurare le caratteristiche della bolle con misure adeguate.

A tal fine, uno specifico progetto di ricerca è in atto presso l'Università di Cagliari con il Particle Image Velocimetry (PIV) tecnica ottica, che permette di misurare lo spostamento con il tempo (e quindi la velocità) di singole particelle a partire da una sequenza di immagini scattate ad intervalli molto piccoli.

Le particelle di carbone flottabili son recuperate solo se la flottabilità prevale. Se le particelle sono ben liberate dalla comminazione la selettività dovrebbe essere buona selettività a prescindere dalla dimensione delle bolle.

Tuttavia questo non è vero per particelle miste: purché la forza di attacco sia sufficiente una singola bolla grande porterà una particella anche se la ganga prevale largamente inquinando così il prodotto, e mentre questo è evitato nel caso di bolle piccole che possono attaccarsi alla stessa particella rendendo la flottazione più selettiva specialmente per le particelle più grossolane.

- Recupero di flottazione

Il più alto recupero osservato durante le prove con agitazione con waterjet può essere spieata dal fatto che la probabilità di collisione bolla particella è aumentata perchè le bolle sono più piccole (e molto più numerose per un dato flusso di aria), più veloci e molto meglio distribuite nella cella che nel caso dell'agitazione meccanica.

Inoltre le bolle più grandi sono più facili da rompere raggiungendo prima lo strato di schiuma perdendo così le particelle attaccate.

L'uso di un numero opportuno di ugelli convenientemente piazzati nello spazio dentro la cella permette di ottimizzare la distribuzione delle bolle moltiplicando i punti di generazione evitando il cammino inverso del flusso di bolle verso il rotore dove si forma un vortice d'aria.

- Capacità di trattamento

Per un più veloce sviluppo del meccanismo di collezione è necessaria una flottazione veloce per raggiungere un dato recupero ricorrendo al waterjet per la generazione delle bolle. Questo è un vantaggio considerevole dal punto di vista economico del processo di arricchimento.

- Consumo di energia

Nonostante il waterjet sia generalmente considerato come una tecnologia ad alto consumo di energia, l'energia specifica richiesta in questa particolare applicazione è relativamente bassa. Infatti per raggiungere una velocità di taglio dieci volte più alta della velocità periferica dei rotori convenzionali è necessaria una pressione relativamente bassa limitando così la potenza idraulica dei getti per unità di volume della cella di flottazione. Il logoramento delle parti della macchina è insignificante dovuto all'assenza di componenti soggetti a consumo in presenza di materiale abrasivo.

4.2.4 Considerazioni conclusive sulle prove di laboratorio

Le performance di separazione di macchine di flottazione disponibili deteriora gradualmente se la dimensione della particella decresce, producendo un basso recupero, qualità insoddisfacente del prodotto e alto consumo di energia specifica e reagenti.

L'uso di getti d'acqua a bassa pressione può essere considerata una via opportuna per migliorare le condizioni richieste per un pieno sviluppo del meccanismo di flottazione specialmente nel caso di minerale fine. I seguenti vantaggi possono essere raggiunti con l'ulteriore miglioramento e lo scale up industriale della tecnologia confrontati con i metodi tradizionali.

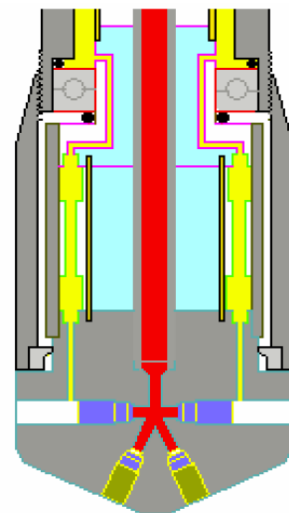
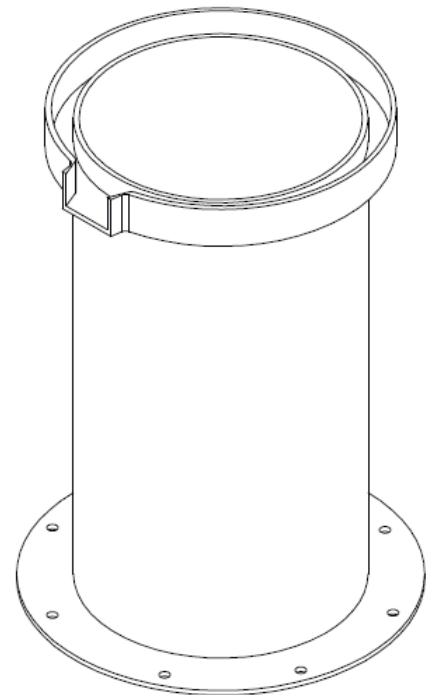
1. caratteristiche delle bolle più favorevoli
2. efficiente controllo del meccanismo di agitazione ottimizzando la geometria degli ugelli e usando getti veloci
3. recupero più alto e migliore selettività specialmente per le dimensioni più fini
4. minore energia specifica consumata
5. Logoramento ridotto
6. ci si aspetta una capacità per unità di volume della cella più alta grazie a una flottazione più veloce

4.3 Scale-up del concetto Hydrojet

Alla luce di quanto emerso dalle prove effettuate con la cella da laboratorio si è deciso allora di aumentare la scala sperimentale ed è stata progettata e costruita una cella da circa 200 litri. Tale cella verrà alimentata con una torbida contenente carbone Sulcis a pezzatura fine e i getti d'acqua saranno prodotti da una lancia water jet con ugelli diametralmente opposti, dotata di moto rotatorio.

Le prove prevedono lo studio delle bolle senza alimentare la torbida di carbone e le relative prove di flottazione del carbone che verrà richiesto alla Carbosulcis SpA.

Figura 6: Cella Hydrojet



Attualmente si sta montando tutto l'apparato sperimentale in particolare si sta predisponendo un sistema per il recupero rapido degli sterili e il sistema di agitazione e alimentazione della torbida. La cella presenta un'altezza di 1 metro con diametro di 50 cm.

Lo scarico degli sterili sarà consentita da un foro dotato di valvola praticato nella cupola emisferica che chiude la cella stessa in basso, collegato ad una pompa centrifuga che li convoglierà in un raccogliore posto nelle vicinanze. Le schiume saranno raccolte nel canale di raccolta e scolo costruito nella parte superiore della cella, che con una debole pendenza le convoglia verso un altro contenitore di raccolta.