



# Sintesi e caratterizzazione di materiali funzionali per la separazione della CO<sub>2</sub> ad alta temperatura

I. Aloisi, K. Gallucci, I. Fiore, G. Vanga, S. Scaccia, S. Stendardo, P. U. Foscolo



## SINTESI E CARATTERIZZAZIONE DI MATERIALI FUNZIONALI PER LA SEPARAZIONE DELLA CO<sub>2</sub> AD ALTA TEMPERATURA

I. Aloisi, K. Gallucci, I. Fiore, P. U. Foscolo (Università degli Studi dell'Aquila)

G Vanga, S Scaccia, S Stendardo (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto B.2: Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

Parte A

Obiettivo a.1: Sorbenti solidi avanzati per cattura della CO<sub>2</sub> ad alta temperatura

Responsabile del Progetto: Ing Stefano Giammartini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Studi e sperimentazioni sulle tecnologie per la produzione di elettricità e idrogeno da syngas da carbone, alimentazione di ossigeno al gassificatore mediante membrane a trasporto ionico, previsione del comportamento di catalizzatori/sorbenti diversamente strutturati, supporto alla messa in linea dei reattori di gassificazione e de-carbonatazione della piattaforma ZECOMIX "

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Stefano Stendardo

Responsabile scientifico UNIVAQ: Prof. Pier Ugo Foscolo

## Indice

1	INTRODUZIONE .....	4
2	MATERIALI E METODI DI CARATTERIZZAZIONE.....	4
2.1	XRD: DIFFRAZIONE A RAGGI X .....	4
2.2	ANALISI SEM/EDS .....	9

## 1 Introduzione

Il presente lavoro rientra nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA ed il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila. In particolare, l'attività descritta in questo lavoro riguarda la caratterizzazione di diverse tipologie di campioni solidi forniti da ENEA attraverso l'utilizzo della tecnica di diffrazione a raggi X, che ha permesso di individuare le fasi presenti nei singoli campioni e di stimarne la relativa percentuale.

## 2 Materiali e metodi di caratterizzazione

### 2.1 XRD: Diffrazione a raggi X

#### *Cenni di teoria*

La diffrazione a raggi X è una tecnica analitica versatile e non distruttiva usata per l'identificazione e la determinazione qualitativa e quantitativa delle fasi cristalline, conosciute come fasi, presenti nelle polveri e nei campioni solidi. Il campione per essere valutato deve essere ridotto in polvere cristallina composta da fini particelle orientate casualmente al fine di avere una distribuzione statistica dell'orientazione delle famiglie di piani reticolari.

Il risultato finale di un'analisi XRD è uno spettro di diffrazione o diffrattogramma, costituito da una serie di picchi o riflessi aventi diverse intensità e posizioni angolari relative alle varie fasi presenti nel campione indagato. In una miscela in cui sono presenti diverse fasi, infatti, il diffrattogramma risulta formato dall'insieme dei singoli patterns associati ad ogni fase cristallina.

Graficando le intensità dei picchi (conteggi o conteggi/secondo) di diffrazione in funzione della posizione angolare  $2\theta$  si ottiene un pattern che è caratteristico del campione esaminato; lo spettro di diffrazione di un cristallo è una caratteristica fisica fondamentale della sostanza, utile non solo per una sua rapida identificazione ma anche per una completa interpretazione della sua struttura. Questo, infatti, mostra le fasi presenti (posizione dei picchi), la concentrazione delle fasi (altezza dei picchi), il contenuto amorfo (andamento e area sottesa al background) e la dimensione/deformazione dei cristalliti (larghezza e forma dei picchi).

L'interpretazione ed identificazione del diffrattogramma si può effettuare per confronto con le oltre 250.000 schede di sostanze cristalline di cui sono noti gli effetti della diffrazione, presenti nei database di riferimento, l'ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) e l'ICDD (International Centre for Diffraction Data).

L'analisi quantitativa permette di determinare le abbondanze delle singoli fasi in un campione multifase e può essere effettuata o mediante la taratura dello strumento in relazione ad ogni fase cristallina presente o mediante l'impiego di un software piuttosto complesso che si basa su analisi Rietveld dei dati sperimentali. Nel nostro caso sono state effettuate analisi semi-quantitative con il metodo dello standard interno: il Reference Intensity Ratio (RIR). Il  $RIR_{\alpha,cor}$  o  $(I/I_{cor})_{\alpha}$  rappresenta il rapporto tra le intensità integrate, per la radiazione  $CuK_{\alpha 1}$ , del picco della fase  $\alpha$  e del picco più intenso dello standard di riferimento, il corindone ( $Al_2O_3$ ) in una miscela 50:50 in peso. Si parla di analisi semi-quantitativa perché il RIR varia in funzione della scelta del background, che, come detto prima, può portare ad errori notevoli.

Per la gran parte delle fasi cristalline i valori dei RIR sono tabulati nella banca dati 'Powder Diffraction File' (PDF) dei database di riferimento e sono questi a cui si è fatto riferimento per effettuare le analisi semi-quantitative dei campioni in esame.

#### *Sintesi del materiale bifunzionale*

Il catalizzatore di nichel è stato supportato su  $\text{CaO-Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$  (85:15) materiale sorbente per la  $\text{CO}_2$  [1] e per confronto su allumina commerciale. È stato scelto il metodo di impregnazione come metodo di deposito del catalizzatore nichel. La soluzione di nichel è stata preparata sciogliendo la corretta quantità di  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  in acqua deionizzata per ottenere un carico di Ni del 10% in peso. La soluzione del precursore di nichel è stata poi dispersa in un grammo di supporto e mescolato mediante agitazione magnetica per tutta la notte. La slurry è stata evaporata a  $80^\circ\text{C}$  in un mantello riscaldante fino ad ottenere una pasta omogenea. Successivamente sono stati aggiunti 5 ml di 2-propanolo, agitato per 2 ore ed essiccato a  $100^\circ\text{C}$ . La pasta risultante è stata riscaldata a  $500^\circ\text{C}$  in aria con velocità di riscaldamento di  $20^\circ\text{C min}^{-1}$  per due ore e raffreddata a temperatura ambiente.

### Metodologia sperimentale

Lo strumento utilizzato per le analisi XRD è un diffrattometro per polveri a geometria Bragg-Brentano, il PANalytical X'Pert PRO, con anticatodo di Cu ( $\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$ ). Si tratta della più comune apparecchiatura utilizzata per la determinazione di uno spettro di polveri il cui principio si basa sull'applicazione della legge di Bragg. La geometria del diffrattometro è di tipo  $\theta$ - $\theta$ : il rivelatore ruota alla stessa velocità angolare della sorgente, mentre il campione resta in posizione orizzontale, ruotando su sé stesso alla velocità scelta.

Un moderno sistema di controllo computerizzato del diffrattometro utilizza programmi automatici per misurare, registrare e interpretare il diffrattogramma unico prodotto dai singoli costituenti in miscele anche di elevata complessità. Il metodo usato è il "metodo delle polveri" che permette di studiare la diffrazione dei raggi X anche per materiali cristallini allo stato di aggregato finissimo incoerente, naturali o artificiali. Il metodo presenta i seguenti vantaggi:

- la sostanza non richiede particolari accorgimenti per la preparazione;
- basta una piccola quantità di campione;
- la sostanza dopo l'analisi rimane inalterata, è quindi possibile recuperare tutto il campione tal quale.

Le caratteristiche tecniche del diffrattometro utilizzato e la configurazione scelta per effettuare le analisi in esame sono di seguito elencate:

- generatore di raggi X (tensione di 40 kV, corrente di 40 mA);
- tubo a raggi X con anodo di Cu ( $K_{\alpha 1} = 1,540598 \text{ \AA}$ ;  $K_{\alpha 2} = 1,54443 \text{ \AA}$ ;  $K_{\beta} = 1,39225 \text{ \AA}$ );
- soller slit da 0,04 rad (fascio incidente) che minimizza la divergenza assiale;
- divergenza slit da  $\frac{1}{2}^\circ$  (fascio incidente) per attenuare la divergenza laterale;
- stage porta campioni orizzontale con spinner per la rotazione del campione in analisi, gestito via software, con velocità di rotazione impostata a 1 giro/sec;
- anti-scatter slit da 8 mm (fascio diffratto) che minimizza lo scattering del porta-campione e dell'aria;
- soller slit da 0,04 rad (raggio diffratto) riduce la divergenza assiale;
- filtro di Ni per soppressione della  $K_{\beta}$  della radiazione del Cu (raggio diffratto) e della fluorescenza indesiderata del campione;
- rivelatore in silicio di tipo MPPC (Multi Pixel Photon Counter), PIXcel<sup>1D</sup>, in modalità lineare (1D);
- goniometro verticale a geometria  $\theta$ : $\theta$  con raggio di 240 mm.

### Preparazione campioni

I campioni sono stati dapprima macinati in un mortaio per ottenere la granulometria più fina possibile, per poi essere setacciati a  $125 \mu\text{m}$  e depositati sul porta campioni, un monocristallo di silicio a zero background. Per far aderire le polveri, è stato utilizzato etanolo, sostanza altamente volatile e non interagente con i campioni in esame. Una volta evaporato tutto l'etanolo, si è passati all'analisi XRD.

### Procedura di acquisizione dati

Il Software in dotazione, utilizzato per la gestione del diffrattometro ed acquisizione dati è: X'Pert Data collector.

I dati sono stati raccolti attraverso una scansione in continuo nelle seguenti condizioni sperimentali:

- Sample mode: reflection
- ScanAxis: gonio. Questa è una scansione  $2\theta - \omega$ , dove  $\omega$  è sempre la metà del valore di  $2\theta$

- Range angolare [ $^{\circ}2\theta$ ]: 5-80
- Step size [ $^{\circ}2\theta$ ]: 0,026
- Time per step: 200 secondi
- Tempo acquisizione (h:m:s): 00:39:07
- Velocità di rotazione: 1 giro/secondo

### Procedura di elaborazione dati

L'acquisizione dati genera file in formato .xrdml, che sono stati poi elaborati con l'ausilio dell'apposito software in dotazione, X'Pert HighScore Plus. Si è quindi effettuato uno studio completo dei pattern acquisiti, sia di tipo qualitativo, con la ricerca e l'identificazione delle fasi, attraverso l'interfacciamento ai database di riferimento (ICSD e ICDD), sia semi-quantitativo, attraverso l'applicazione del metodo RIR.

In particolare, l'elaborazione ed analisi passa per i seguenti step:

#### 1. Determinazione e sottrazione del background.

Un background non lineare è imputabile a:

- a) scattering dell'aria;
- b) scattering del porta-campione;
- c) scattering del campione;
- d) fluorescenza del campione;
- e) presenza di materiale amorfo nel campione.

È stata scelta la modalità automatica che approssima il fondo con un metodo iterativo (Sonneveld & Visser). I parametri di background fissati sono:

- *bending factor* (curvatura del background), posto uguale a zero;
- *granularity* (numero di intervalli utilizzato per la determinazione del background), fissato ad un valore di 70.

#### 2. Ricerca dei picchi con il metodo della derivata seconda, scegliendo i seguenti parametri di profilo:

- Minimum significance = 1,00 (è il minimo rapporto tra altezza del picco e rumore di fondo)
- Minimum tip width [ $^{\circ}2\theta$ ] = 0,2
- Maximum tip width [ $^{\circ}2\theta$ ] = 2,00

Questi ultimi due parametri fissano il range di distanza tra due punti di flesso all'interno del quale si identifica un picco.

- Peak base width [ $^{\circ}2\theta$ ] = 4,00 (è la minima larghezza di base di un picco)

#### 3. Interpolazione del profilo sperimentale mediante il Profile Fit (modalità di default);

#### 4. Ricerca delle fasi presenti nello spettro attraverso il confronto sia dei dati dei picchi che del profilo della curva sperimentale con schede standard di riferimento.

I database utilizzati sono stati 2: l'ICSD e l'ICDD, comprendente oltre 250.000 schede; la ricerca ha riguardato, in alcuni casi, una restrizione sulle schede di confronto, considerando solo composti ottenibili dagli elementi presenti dei singoli campioni in altri una ricerca più ampia senza alcuna restrizione poiché più incerta la loro composizione.

### Risultati e discussione

Tutti i campioni forniti da ENEA sono stati analizzati attraverso la tecnica di diffrazione a raggi X presso i Laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università degli Studi dell'Aquila.

Gli 4 campioni analizzati al diffrattometro sono stati i seguenti:

- 1) NiO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- 2) Olivine Tq
- 3) Olivine gasif. 12122013
- 4) Olivine gasif. 27022014

I nomi sono quelli riportati sull'etichetta, dai quali si è risaliti ai possibili elementi chimici presenti, dedotti in questo modo in mancanza di ulteriori informazioni. Per quel che riguarda i quantitativi

utilizzati, questi sono stati molto piccoli, dell'ordine di 0.02 g per tutti i campioni, in virtù delle scarse quantità a disposizione. Le figure che seguono riportano i pattern di diffrazione di tutti i campioni analizzati, con le fasi individuate e i relativi quantitativi, individuati attraverso un'analisi semi-quantitativa effettuata con il metodo RIR precedentemente descritto che ha permesso di stimare dei valori percentuali indicativi delle singole fasi, rappresentati nel diagramma a torta in figura.

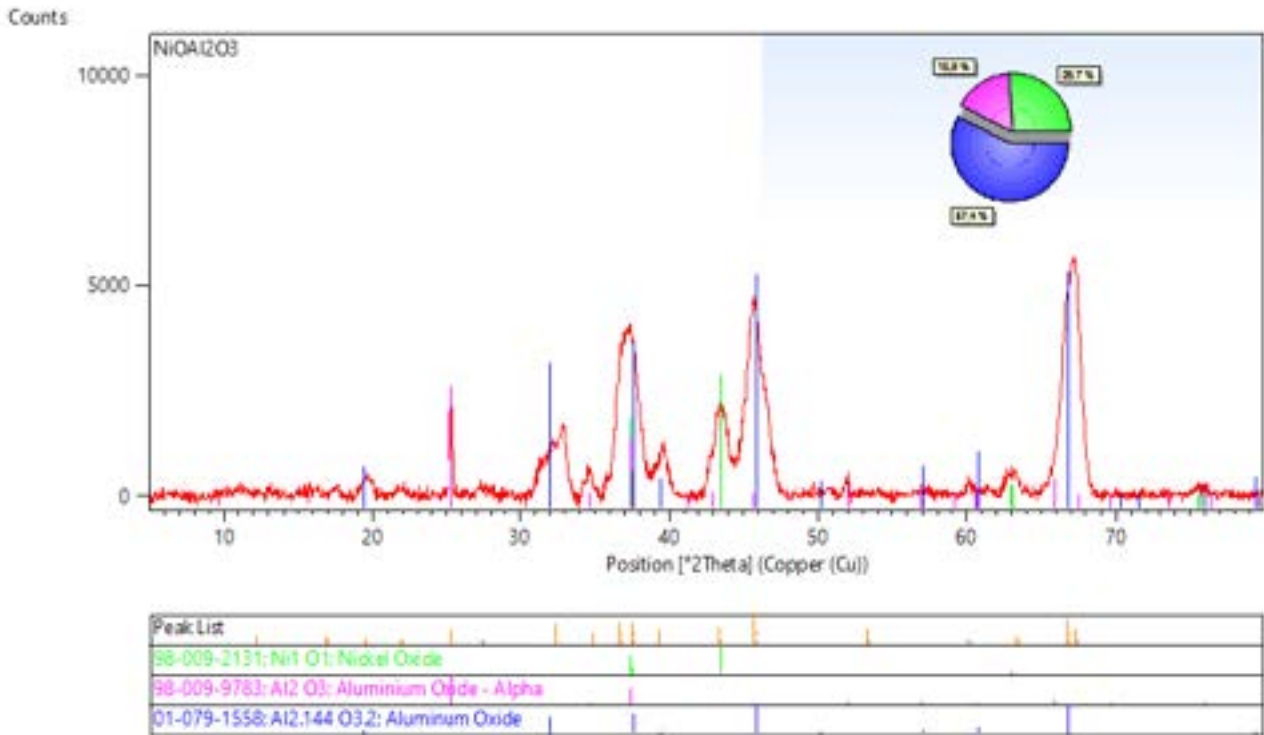


Figura 2. Pattern XRD del campione "NiO-Al2O3"

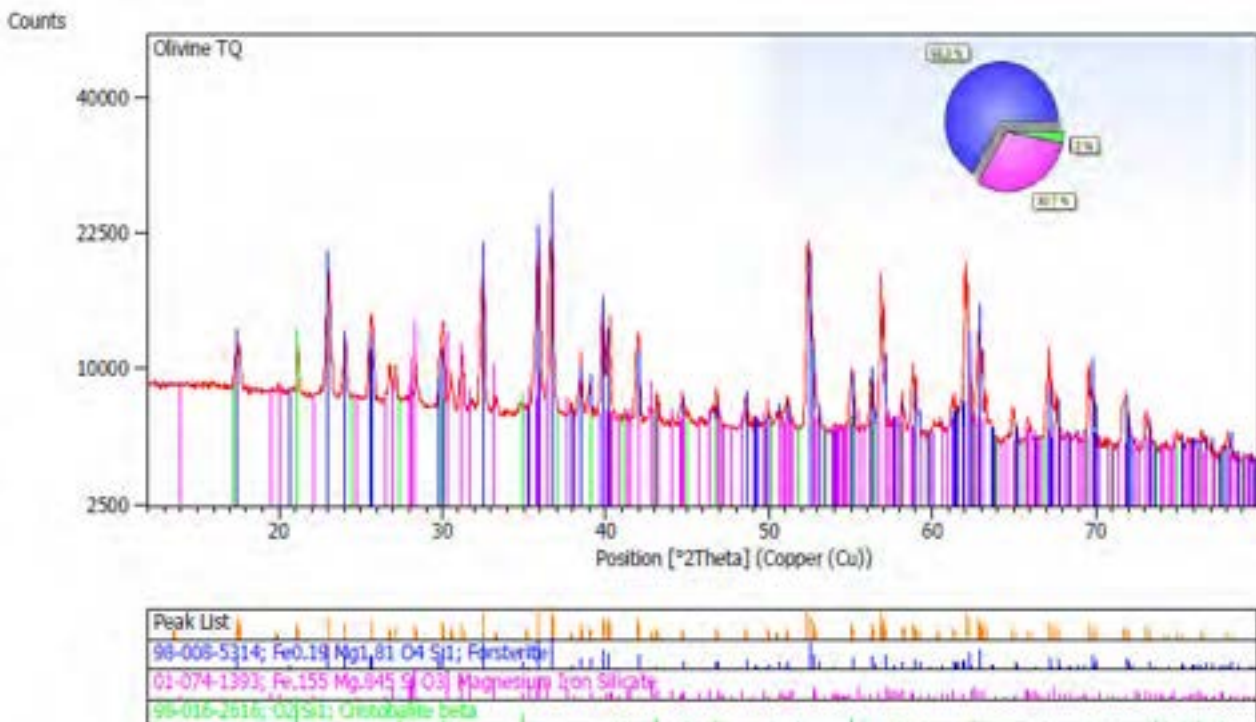


Figura 4. Pattern XRD del campione “Olivine TQ”

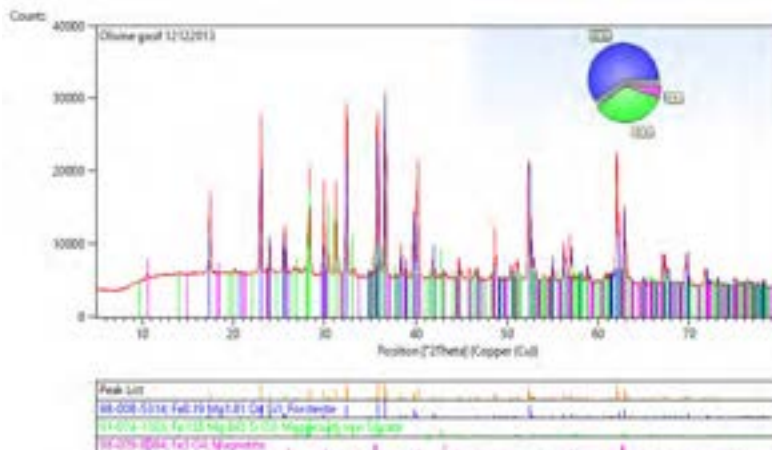


Figura 5. Pattern XRD del campione “Olivine gasif. 12122013”

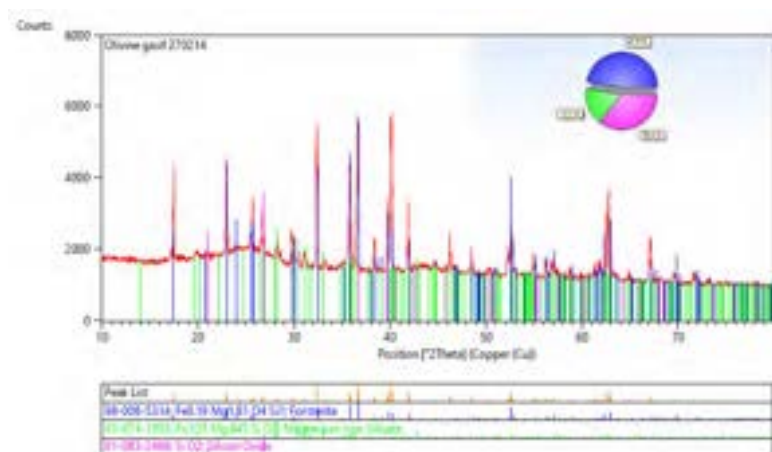


Figura 6. Pattern XRD del campione “Olivine gasif. 270214”

Nella tabella che segue vengono riassunti i risultati ottenuti con le analisi XRD effettuate; in particolare, per ogni campione si riportano le fasi individuate e le relative percentuali determinate attraverso analisi semi-quantitative.

Campione	Fasi individuate	Composizioni % indicative
NiO-Al2O3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.8%
	Al <sub>2,144</sub> O <sub>3,2</sub>	57.5%
	NiO	25.7%
Olivine TQ	Fe <sub>0.19</sub> Mg <sub>1.81</sub> O <sub>4</sub> Si (Forsterite)	66.3%
	Fe <sub>0.155</sub> Mg <sub>0.845</sub> SiO <sub>3</sub>	30.7%
	SiO <sub>2</sub> (Cristobalite)	3%
Olivine gasif. 12122013	Fe <sub>0.19</sub> Mg <sub>1.81</sub> O <sub>4</sub> Si (Forsterite)	60%
	Fe <sub>0.155</sub> Mg <sub>0.845</sub> SiO <sub>3</sub>	35%
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (Magnetite)	5%
Olivine gasif. 27022014	Fe <sub>0.19</sub> Mg <sub>1.81</sub> O <sub>4</sub> Si (Forsterite); Fe <sub>0.155</sub> Mg <sub>0.845</sub> SiO <sub>3</sub> ; SiO <sub>2</sub>	47.5%; 17.1%;35.4%

Tabella 1: Fasi individuate mediante la diffrazione a raggi X e relative percentuali

## 2.2 Analisi SEM/EDS

Ulteriori campioni sono stati sintetizzati attraverso deposizione di grani di nickel su materiale sorbente  $\text{CaO}/\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ . Tali campioni sono stati analizzati attraverso microscopio elettronico a scansione (SEM) per vederne la struttura esterna e osservarne l'eventuale distribuzione di catalizzatore sul materiale sorbente. La figura 7 mostra un'analisi SEM/EDS di un materiale bi-funzionale (catalizzatore/sorbente).

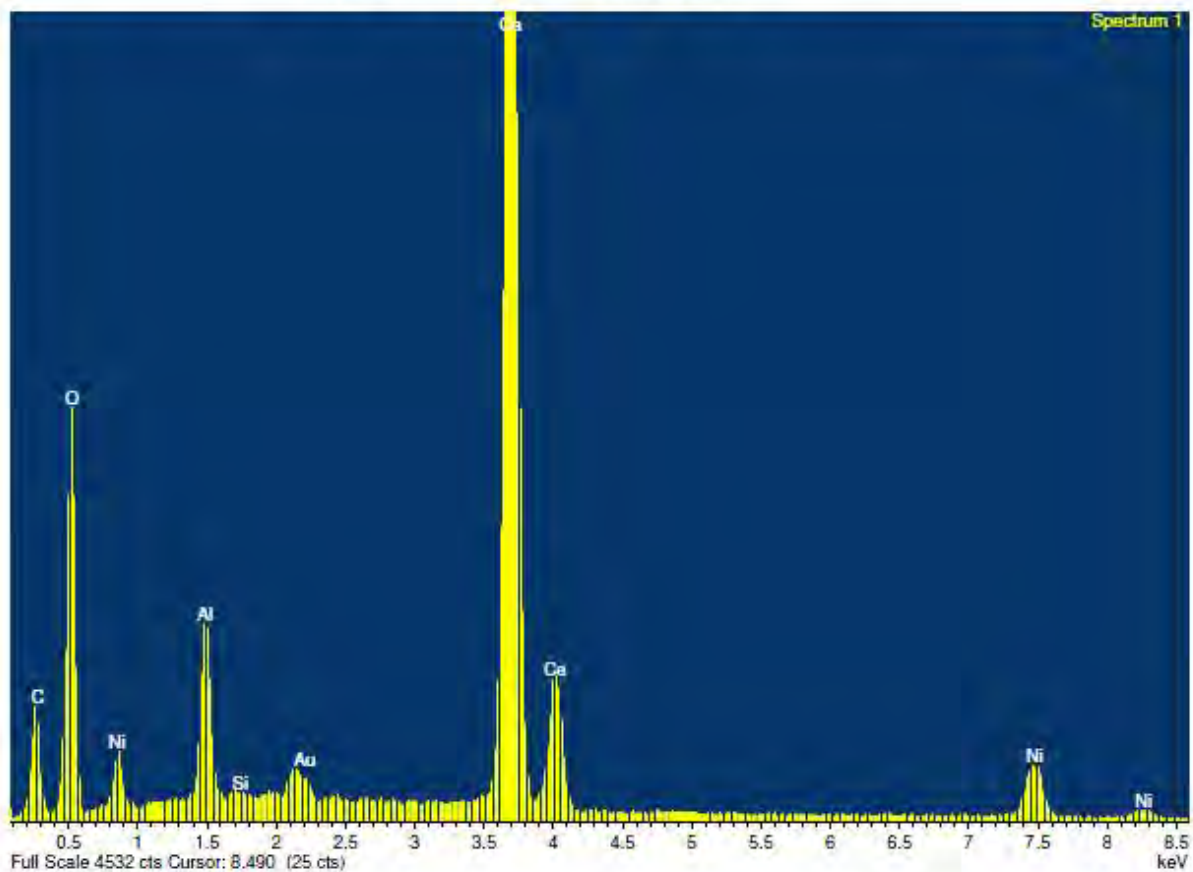
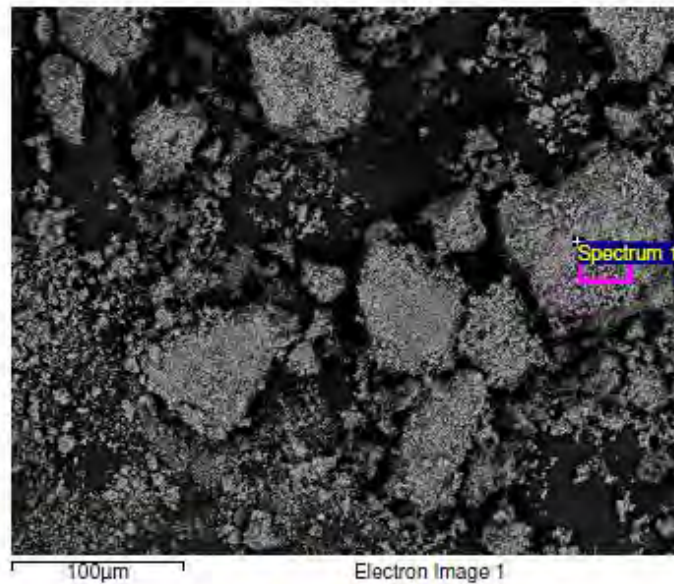


Figura 7 Analisi SEM/EDS lo spettro mostra la presenza di Ni e Ca, Al, O uniformemente distribuiti nel campione

Si vede come gli elementi principali che compongono il materiale bi funzionale siano uniformemente distribuiti sulla superficie del campione analizzato. Aumentando il grado di ingrandimento, si può notare come il materiale mostri una struttura porosa e granulare che facilita la diffusione della CO<sub>2</sub> all'interno del materiale sintetico.

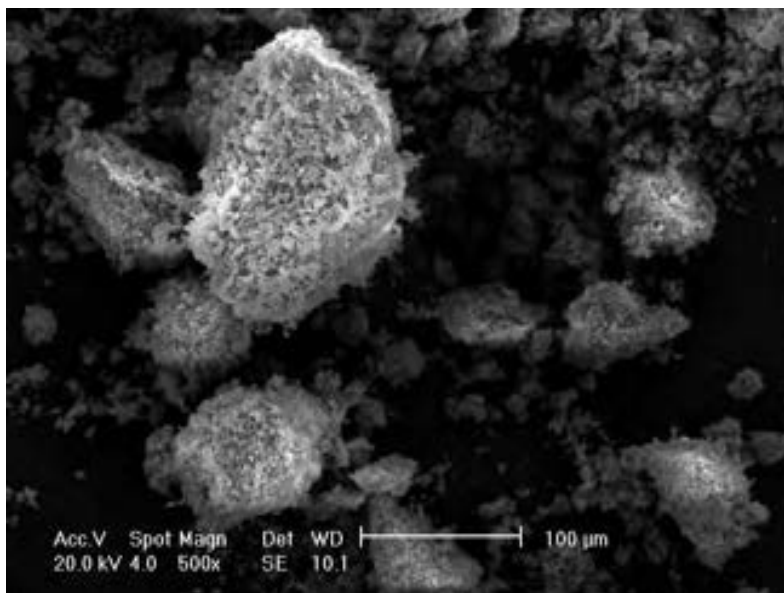


Figura 8 Analisi SEM materiale Ni/ Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub>

### *Bibliografia*

S. Stendardo, L.K. Andersen, C. Herce, Self-activation and effect of regeneration conditions in CO<sub>2</sub>-carbonate looping with CaO–Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub> sorbent, Chemical Engineering Journal, 220 (2013) 383-394

## Curriculum scientifico

### **Ilaria Aloisi**

Nata a Rieti il 15 Gennaio 1984

Laurea Magistrale in Ingegneria Chimica presso l'Università degli Studi dell'Aquila, conseguita nel 2012 con la votazione di 110/110 e lode.

Tesi elaborata presso lo Stabilimento Farmaceutico Sanofi di Scoppito (AQ), in seguito ad un tirocinio formativo della durata di 6 mesi (05/2012 – 11/2012) svolto presso il settore HSE (Health, Safety and Environment), con lo scopo di ridurre l'impatto sull'ambiente dei rifiuti prodotti nel Sito.

Da Maggio 2013 assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università degli Studi dell'Aquila, nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e Università dell'Aquila, per una attività di ricerca dal titolo: "Studi e sperimentazioni sulle tecnologie impiantistiche ZECOMIX per la produzione di elettricità e idrogeno da syngas da carbone (sorption enhanced gasification) e metano (sorption enhanced steam reforming) - supporto alla messa a punto della piattaforma Casaccia."

### **Katia Gallucci**

Laurea in Ingegneria Chimica presso l'Università degli Studi di L'Aquila nel 2000, votazione 110/110 e lode.

Dottorato in Ingegneria e Modellistica Fisico Matematica nel 2004

#### ATTIVITÀ DI RICERCA

Gennaio-Luglio 2002: Collaborazione presso la University College London in merito alla simulazione del "Particle Bed Model" utilizzando il software commerciale CFX-4 (Borsa di studio Erasmus)

2003-2005 Partecipazione al progetto PRIN2003 "Caratterizzazione sperimentale e modelli di simulazione per sistemi fluido-solido granulari nell'industria di processo"

Maggio-Ottobre 2004: Contratto di collaborazione tecnica-scientifica presso l'Università degli studi di L'Aquila "Studio sperimentale dei criteri per la valutazione della qualità della fluidizzazione"

Ottobre 2004-Ottobre 2005: Assegno di ricerca annuale nel settore scientifico-disciplinare: ING-IND/26 - Teoria dello Sviluppo dei Processi Chimici; ING-IND/24 - Principi di Ingegneria Chimica; ING-IND/25 - Impianti Chimici dal titolo: "Caratterizzazione Sperimentale e Modellistica di apparecchiature a letto fluidizzato"

Ottobre-Novembre 2005: Contratto di collaborazione occasionale presso l'Università degli studi di L'Aquila "Studio della fluidizzazione omogenea: collaborazione per la documentazione finale e presentazione dei risultati sperimentali"

2005-2007 Partecipazione al progetto PRIN2005 "Studi su meccanismi chiave del comportamento di letti fluidizzati e loro implementazione in strumenti di simulazione numerica per applicazioni nell'industria di processo"

Marzo-Giugno 2006: Contratto di collaborazione tecnica-scientifica presso l'Università degli studi di L'Aquila "Misura dell'onda dinamica in letti omogenei"

Febbraio-Maggio 2007: Contratto di collaborazione occasionale presso il Distretto Tecnologico IMAST Scarl (Portici, NA) sul progetto PIROS "Progettazione Integrata di componenti multifunzionali per applicazioni in sistemi del settore ferrotranviario e dei vettori di medie dimensioni, associata alla RealizzaziOne di Speciali "facilities" per prove e qualificazioni di materiali in condizioni di fiamma"

Giugno 2006-Giugno 2007: Assegno di ricerca annuale nel settore scientifico-disciplinare: ING-IND/26 - Teoria dello Sviluppo dei Processi Chimici; ING-IND/24 - Principi di Ingegneria Chimica; ING-IND/25 - Impianti Chimici dal titolo: "Idro-gassificazione del carbone e sequestrazione della anidride carbonica con ossido di calcio"

Agosto-Novembre 2007: Contratto di collaborazione tecnica-scientifica presso l'Università degli studi di L'Aquila "Ricerca sperimentale su vari aspetti della qualità della fluidizzazione"

Dicembre 2007-Novembre 2008: Assegno di ricerca annuale nel settore scientifico-disciplinare: ING-IND/26 - Teoria dello Sviluppo dei Processi Chimici dal titolo: "Studi su meccanismi chiave del comportamento di letti fluidizzati per applicazioni nell'industria di processo"

Dicembre 2008-Marzo 2012: Contratto di Ricercatore a tempo determinato (art.1 comma 14 L. 230/05), finanziato nell'ambito del Progetto di Ricerca Europeo UNIQUE: "Integration of particulate abatement, removal of trace elements and tar reforming in one biomass steam gasification reactor yielding high purity syngas for efficient CHP and power plants"

Aprile 2012: Ricercatore non confermato, Settore: ING-IND/27 Chimica Industriale e Tecnologica, Settore concorsuale: 09/D3.

Autrice di 49 pubblicazioni di cui 13 articoli su riviste internazionali, 4 contributi in volumi.

## **Pier Ugo Foscolo**

### **Dati Personali**

Nato a Roma il 24 novembre 1948

Sposato, due figli

Laurea con lode (1972) in Ingegneria Chimica all'Università "La Sapienza", Roma

Professore ordinario di Reattori Chimici

Preside della Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila

### **Esperienze Professionali**

Professore Ordinario (1989 - ad oggi)

Dipartimento di Chimica, Ingegneria Chimica e Materiali dell'Università dell'Aquila

Professore Associato (1983 - 1989)

Università dell'Aquila

Research Associate (1980 - 1982)

Dipartimento di Ingegneria Chimica e Biochimica, University College London, UK

Ricercatore (1974 - 1979)

Università dell'Aquila

### **Membro delle Società Professionali**

- AIChE, American Institute of Chemical Engineers
- AIDIC, Associazione Italiana di Ingegneria Chimica

### **Principali attività**

- Coordinatore del Progetto Europeo UNIfHY (2012-2015) dal titolo "UNIQUE gasifier for hydrogen production" (Proposal N. 299732), presentato nell'ambito del CIRPS (centro interuniversitario di ricerca per lo sviluppo sostenibile). Questo progetto, ammesso al finanziamento dalla Commissione Europea, è attualmente in fase di negoziazione. La proposta mira a sviluppare un processo di gassificazione della biomassa con vapore, integrato con la purificazione del gas di sintesi per la produzione di idrogeno puro. Esso si basa sull'utilizzo di componenti di impianto di comprovate prestazioni e affidabilità (sistema di gassificazione UNIQUE, accoppiato con depurazione dei gas caldi e condizionamento catalitico, reazione di shift del gas d'acqua, Pressure Swing Adsorption per la separazione dell'idrogeno puro).

- Coordinatore del Progetto Europeo UNIQUE 211517 (2007 - 2010) dal titolo "Integration of particulate abatement, removal of trace elements and tar reforming in one biomass steam gasification reactor yielding high purity syngas for efficient CHP and power plants". Questo progetto è stato finanziato dalla Commissione Europea come risultato del primo bando sul tema Energia del 7 programma quadro dell'UE, ottenendo 14.5/15 punti nella valutazione, il miglior punteggio tra migliaia di proposte che sono state presentate da tutta Europa. Il risultato principale delle ricerche è stato quello di sviluppare una versione compatta di un gassificatore, integrando la gassificazione con vapore della biomassa, la pulizia a caldo dei gas e il sistema di condizionamento catalitico in un unico reattore.

- Coordinatore del progetto finanziato dalla UE ENK3-CT2000-0314 (2001 - 2004) "Biomass-gasification and fuel-cell coupling via high-temperature gas clean-up for decentralised electricity generation with improved efficiency". L'impianto pilota (500 kWth) di gassificazione della biomassa in Trisaia (ENEA) è stato dotato di una sezione di pulizia del gas combustibile, che serve ad alimentare una cella a combustibile a carbonati fusi (MCFC). Inoltre, le attività di ricerca hanno riguardato ulteriori studi sulla reattività del catalizzatore, sulla simulazione del sistema integrato e modellazione CFD del gassificatore.

- Leader del gruppo di ricerca dell'Università degli Studi dell'Aquila nel progetto finanziato dalla UE JOR3-CT98-0196 (1998 - 2000) "Hydrogen-rich gas from biomass steam gasification". Un'unità pilota da 500kWh è stata realizzata, secondo la tipologia di un doppio reattore, a letto fluidizzato circolante internamente, in grado di produrre un gas combustibile con un elevato potere calorifico (tenore di azoto quasi trascurabile). L'impianto è situato nel centro di ricerca Trisaia dell'ENEA. Le prove di gassificazione effettuate presso l'Università dell'Aquila hanno permesso di verificare le prestazioni di un nuovo catalizzatore a base di nichel sviluppato nel progetto, da utilizzare come materiale del letto nel gassificatore, per il cracking e il reforming del tar e per migliorare il contenuto di idrogeno nel gas prodotto.
- Coordinatore del progetto finanziato dalla UE JOR3-CT95-0037 (1995 - 1997) "Production of hydrogen-rich gas by biomass gasification: application to small-scale, fuel cell electricity generation in rural areas". Oltre al coordinamento di tutto il progetto, il gruppo di ricerca ha lavorato sulla fattibilità del sistema integrato e l'analisi dei costi.
- Coordinatore della Unità dell'Università dell'Aquila nel progetto Europeo TEMPUS IV "Chemical Engineering: Curriculum development and international recognition" (2009 -).
- Coordinatore del Progetto Tempus Tacis JEP-10096 in Ingegneria Chimica, che ha coinvolto Italia, Regno Unito e il Kazakistan (1995 - 1998); professore onorario presso la Kazakh National Technical University, Almaty.
- Coordinatore di progetti di ricerca finanziati da istituzioni pubbliche italiane e da industrie del settore, tra questi:
  1. MIUR (Ministero Istruzione Università e Ricerca). "Similitudine fluidodinamica in reattori a letto fluidizzato";
  2. LONZA S.p.A. "Fluidodinamica dei reattori a letto fluidizzato";
  3. EUROPEAN VINYL CORPORATION S.p.A. "Studi di modelli freddi di reattori a letto fluidizzato";
  4. ENTE NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE L'ENERGIA E L'AMBIENTE (ENEA) "Tecnologie di gassificazione a letto fluidizzato di rifiuti agro-industriali per la produzione di energia elettrica"; "Processi ad emissioni zero per la produzione di un gas ricco di idrogeno da gassificazione del carbone";
  5. PALL SCHUMACHER GmbH "Filtrazione di gas e filtrazione catalitica ad alta temperatura".
  6. ENI - centro ricerche energie non convenzionali "combinazione di gassificazione di biomasse con la produzione di idrocarburi con processo FT".
- Presidente del corso di laurea in Ingegneria Chimica presso l'Università dell'Aquila (2000 - 2003).
- Membro del consiglio di amministrazione dell'Università dell'Aquila (2004 - 2007).
- Preside della Facoltà di Ingegneria presso l'Università dell'Aquila (2007 - oggi).
- Membro del comitato scientifico di numerose conferenze internazionali, tra le quali la World Chemical Engineering Conference (Glasgow - UK - August 2007), e la Int. Conf. on Polygeneration Strategies (Vienna - Austria - September 2009).
- Chairman del comitato scientifico della Fluid-Particle Interaction Conference, Davos, Svizzera, Maggio 1993, organizzata da Engineering Foundation, New York.
- Visiting professor all'Università Louis Pasteur di Strasburgo (Giugno-Luglio 2008).
- Reviewer di: Chemical Engineering Science, AIChE Journal, International Journal of Multiphase Flow, Industrial and Engineering Chemistry Research, Powder Technology, International Journal of Hydrogen Energy, ecc.
- Autore di oltre un centinaio di articoli su riviste scientifiche internazionali e convegni.
- Nominato esperto dalla Commissione europea per la valutazione delle proposte di ricerca nel campo delle fonti energetiche rinnovabili.
- Relatore di numerosi progetti di dottorato di ricerca, tra questi, uno in cotutela con l'Università di Strasburgo sulla cattura di CO<sub>2</sub> per mezzo di un sorbente solido.