



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PALERMO



21  
Università degli Studi di Palermo 1892-2016

# I sistemi innovativi a biomassa granulare

Innovative wastewater  
treatment technologies  
for energy saving and  
environmental  
protection

May 20, 2016 - Palermo






Michele Torregrossa




Università di Palermo  
Dipartimento di Ingegneria Civile,  
Ambientale, Aerospaziale, dei  
Materiali (DICAM)

## I sistemi innovativi a biomassa granulare

1. Introduzione
2. Il fenomeno della granulazione aerobica
3. Schema di un GSBR
4. Modelli di simulazione
5. Condizioni operative di un reattore GSBR
6. Rendimenti di rimozione
7. Evoluzione dei sistemi aerobici granulari e prime applicazioni in piena scala



Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo



### Introduzione

I trattamenti convenzionali per la depurazione delle acque reflue presentano numerose limitazioni legate principalmente a:







- notevole richiesta di aree per la realizzazione di tutte le unità di processo;
- elevata produzione di fango di supero;
- bassa flessibilità in relazione alle elevate fluttuazioni di carico organico.

Il processo a fanghi attivi e i sistemi convenzionali a biomassa adesa, inoltre, nei casi in cui è richiesta anche la rimozione dei nutrienti, necessitano di più unità con specifica funzione.

Negli ultimi dieci anni si è avuto lo sviluppo di reattori aerobici a biomassa granulare, prima in scala da laboratorio, poi negli ultimi cinque anni, anche in piena scala.

La maggior parte degli studi scientifici condotti, e così pure le prime applicazioni, sono stati mirati al trattamento di reflui industriali come quelli provenienti da industrie casearie, farmaceutiche, ittico-conserviere, cantine vinicole, di lavorazione del malto, mattatoi, petrochimiche.

Da qualche anno, sono attivi anche alcuni impianti di trattamento di reflui urbani di consistente dimensione (n.8 al gennaio 2015).








Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

### Introduzione


In questi sistemi:

- è possibile operare con elevate concentrazioni di biomassa (fino a 20 gSS/L) e alti carichi organici (fino a 15 kgCOD/m³-giorno) ottenendo al contempo basse produzioni di fango di supero;
- è necessario soltanto il 25% dell'area necessaria per un sistema convenzionale a fanghi attivi;
- si possono ridurre i consumi energetici del 25÷30%;
- la bassa produzione di fango di supero, le ridotte dimensioni dei reattori e i minori consumi energetici potrebbero ridurre anche del 50% i costi di investimento e di gestione dell'impianto.

Per contro, il processo di granulazione e il mantenimento della struttura dei granuli a regime, richiede una notevole attività di controllo e, al momento, sussistono anche forti vincoli legati ai brevetti.



Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo



Introduzione

La tecnologia a fanghi granulari fece i primi passi con la messa a punto dei sistemi UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), operanti in condizioni anaerobiche.

COD<sub>input</sub>  
θ<sub>HRT</sub>  
COD<sub>rimosso</sub>  
OLR

: 5.000 ÷ 15.000 mg·L<sup>-1</sup>  
: 4 ÷ 12 ore  
: 75 ÷ 85 %  
: 4 ÷ 12 kgCOD·m<sup>-3</sup>·d<sup>-1</sup>

Presenta i seguenti svantaggi:

- lungo start-up richiesto (2÷4 mesi);
- alta temperatura operativa (35÷50 °C);
- impossibilità di rimuovere N e P;
- necessità di affinamento successivo.

Gas  
Effluente  
Campane di raccolta gas  
Sludge Blanket  
Influente

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

Introduzione

La tecnologia a fanghi granulari aerobici è stata sviluppata a partire dagli anni '90 in reattori AUSB (Aerobic Upflow Sludge Blanket) (Mishima e Nakamura, 1990) e, successivamente è stata perfezionata da Morgenroth (1997) e Beun (1999 e 2002) con i reattori GSB (Granular Sequencing Batch Reactor).

DEFINIZIONE

“1st IWA-Workshop Aerobic Granular Sludge” a Monaco di Baviera (2004):

«I granuli che compongono il fango attivo aerobico granulare devono essere concepiti come aggregati di origine microbica, che non si formano sotto condizioni di ridotto sforzo idrodinamico, e che sedimentano a velocità significativamente più alte dei fiocchi di fango attivo».

Beun et al. (2002)

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

Il fenomeno della granulazione aerobica

Finora è stata ottenuta in reattori SBR, la cui caratteristica è quella di essere alimentati in maniera discontinua e di operare in fasi sequenziali secondo il seguente ordine:

- alimentazione
- reazione
- sedimentazione
- scarico surrante
- attesa

Le varie fasi hanno durate differenti a seconda delle necessità operative.

Alimentazione Reazione Sedimentazione Scarico Attesa

Attualmente i pochi impianti realizzati in piena scala sono tutti di tipo SBR.

Tuttavia, nella letteratura scientifica del settore, dalla fine del 2014 si cominciano a reperire rapporti di esperienze condotte in condizioni di alimentazione con flusso continuo.

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

Il fenomeno della granulazione aerobica

Processo con potenzialità molto elevate:

Consente di integrare in unico reattore le rimozioni degli inquinanti (organici, azoto e fosforo) e anche la fase di sedimentazione.

I fenomeni diffusivi che in esso si instaurano costituiscono una valida difesa nei confronti di sostanze tossiche o inibenti.

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

Michele Torregrossa

2

Il fenomeno della  
granulazione aerobica

Interazioni cellula-cellula che determinano la formazione di densi bio-aggregati:

Fase 1: contatto cellula-cellula;

Fase 2: attrazione dei piccoli aggregati;

Fase 3: l'unione di questi aggregati e sviluppo di microstrutture dense e compatte.

Il tempo necessario per la formazione di  
granuli stabili e maturi varia da 30 a 120 giorni.

I granuli si formano attraverso l'auto-immobilizzazione di microrganismi e la conseguente formazione di densi agglomerati che contengono milioni di organismi per grammo di biomassa.

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

DICAM

Il fenomeno della  
granulazione aerobica

Caratteristiche fisiche e morfologiche dei granuli:

❖ superficie esterna quasi sferica;

❖ dimensioni maggiori rispetto ai fiocchi di fango attivo;

❖ velocità di sedimentazione molto elevate (> 60 m/h).

Non sono necessari supporti per la loro formazione!

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

DICAM

Il fenomeno della  
granulazione aerobica

Caratteristiche fisiche e morfologiche dei granuli

Macrostruttura di granuli maturi

Microstruttura di granuli maturi

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

DICAM

Il fenomeno della  
granulazione aerobica

Caratteristiche fisiche e morfologiche dei granuli:  
confronto fra fiocchi di fango attivo e fango granulare

Fiocco fango attivo

Fango granulare

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

DICAM

Il fenomeno della  
granulazione aerobica

**INOCULO e COLTIVAZIONE DEI GRANULI:**

È possibile effettuare lo start-up inoculando con fango attivo prelevato da un impianto di depurazione di tipo convenzionale.

In molti casi si è proceduto riducendo nel tempo la durata del ciclo.

Il tempo di sedimentazione si va via via riducendo: per esempio 7' → 5' → 3' → 2'

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

Il fenomeno della  
granulazione aerobica

**INOCULO e COLTIVAZIONE DEI GRANULI:**

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

Il fenomeno della  
granulazione aerobica

**NOTE:**

Sembra che ci sia una “finestra” relativamente piccola per il successo nella formazione dei granuli.

È un processo molto delicato che necessita di una costante attività di controllo dei parametri che ne indicano l'andamento.

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

Il fenomeno della  
granulazione aerobica

La formazione dei granuli aerobici è influenzata da diversi parametri, quali:

- ❖ **Carico organico volumetrico** (> 1,2 KgCOD/m<sup>3</sup>-giorno per accelerare la formazione)
- ❖ **Sforzi di taglio idrodinamici:**  
In termini di velocità superficiale del flusso d'aria ascensionale (>1,2 cm/sec), alti valori di esso favoriscono la formazione dei granuli, ne migliorano la densità e stimolano la produzione dei polisaccaridi.
- ❖ **Produzione di EPS (Extracellular Polysaccharides Substance)**  
I polisaccaridi svolgono il doppio ruolo di adesione – coesione delle cellule microbiche, contribuendo, sia alla formazione dei granuli che al mantenimento della loro stabilità ed integrità.
- ❖ **Idrofobicità della superficie cellulare:**  
All'aumentare di essa è favorita l'interazione fra le cellule.
- ❖ **Concentrazione di ossigeno disciolto** (> 6 mg/l)

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

Michele Torregrossa

4



Il fenomeno della  
granulazione aerobica

❖ **HRT (Tempo di Ritenzione Idraulica)**  
HRT compresi tra 2-12 ore provocano un aumento della produzione di EPS e dell'idrofobicità che migliorano le caratteristiche di sedimentabilità.

❖ **Pressione di selezione idraulica** (3-5 m/h) che dipende dai **tempi di sedimentazione**.

❖ **Fase di abbondanza e di inedia**  
La prima è la fase in cui il substrato è a disposizione dei batteri prima di essere consumato. Non appena il substrato viene consumato inizia il periodo di inedia. Durante l'inedia aumenta l'idrofobicità a favore dell'auto-aggregazione e vengono degradati gli EPS in eccesso.

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

TEMPI DI SEDIMENTAZIONE

Il fenomeno della  
granulazione aerobica

Fango attivo

$V_s = 0.8+1 \text{ m/h}$

$V_s = 10+60 \text{ m/h}$

Granuli aerobici

$SVI_{30} = 30+50 \text{ ml/g}$

$\rightarrow$

$SVI_5 = 50+60 \text{ ml/g}$

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

ALTERNANZA DI FASI

Il fenomeno della  
granulazione aerobica

Nei sistemi SBR la rimozione della sostanza organica avviene in due distinte fasi:

FEAST  $\rightarrow$  Accumulo di riserve  
(periodo di abbondanza)

FAMINE  $\rightarrow$  Crescita cellulare  
(periodo di inedia)

Il primo coincide con la fase immediatamente successiva all'alimentazione, in cui il substrato è disponibile. Non appena tutto il substrato viene consumato, inizia il periodo dell'inedia. Tale periodo assume un ruolo importante nella granulazione.

La differente profondità di penetrazione dell'ossigeno nelle due fasi determina la stratificazione della struttura del granulo.

FEAST

FAMINE

Granule

Liquid

Granule

Liquid

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

STRATIFICAZIONE

Il fenomeno della  
granulazione aerobica

ORGANISMI  
ETEROTROFI

ORGANISMI  
AMMONIO-OSSIDANTI

ZONA ANAEROBICA/ANOSSICA:  
- Denitrificazione  
- Rimozione del fosforo

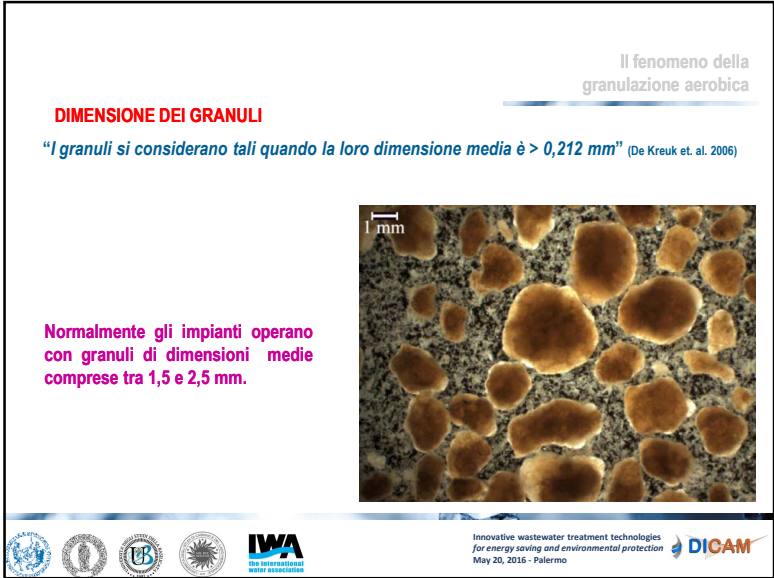
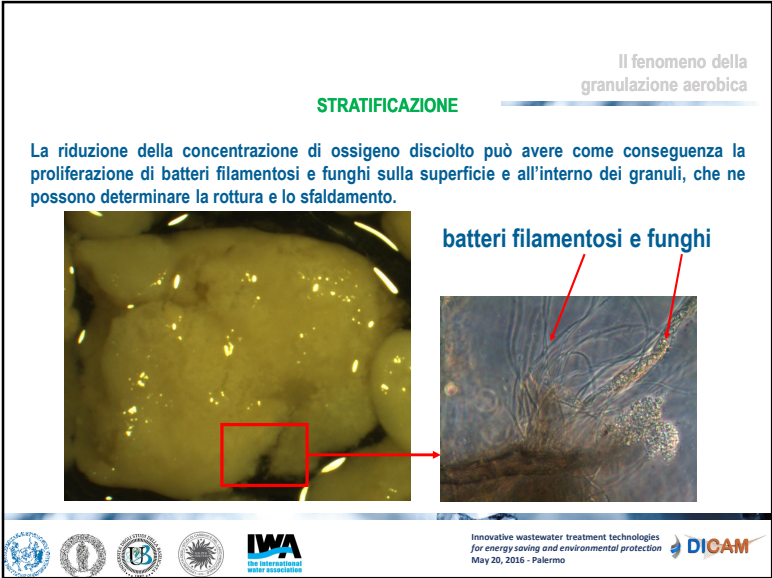
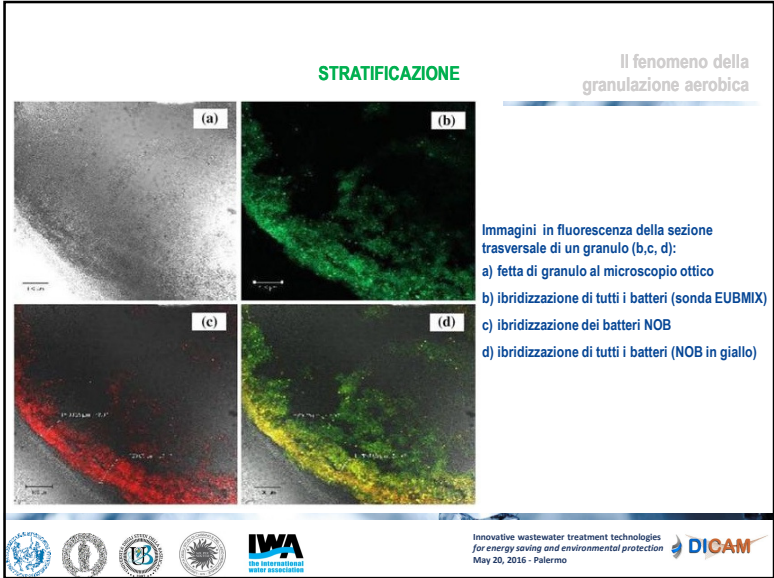
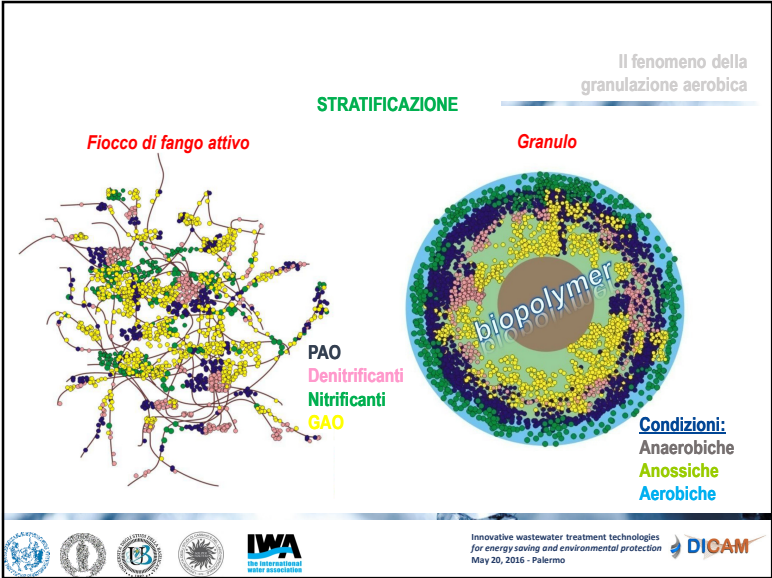
ZONA AEROBICA:  
- Ossidazione biologica  
- Ossidazione dell'azoto ammoniacale

Quello che negli impianti a fanghi attivi viene svolto in diversi reattori può essere ottenuto all'interno di un granulo.

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

Michele Torregrossa

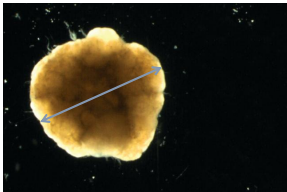
5



Il fenomeno della  
granulazione aerobica

DIMENSIONE DEI GRANULI E TASSO DI GRANULAZIONE

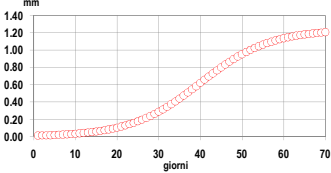
Per valutare lo sviluppo del diametro sono stati messi a punto modelli matematici di previsione:




Es.:  $D(t) = \frac{D_{max}}{1 + e^{-k(t-t_0)}}$  (Su & Yu, 2005)

dove:


- $D(t)$  è il diametro medio al giorno  $t$  [mm]
- $D_{max}$  è l'asintoto della curva [mm]
- $k$  è il tasso di sviluppo specifico del diametro [ $d^{-1}$ ]
- $(t-t_0)$  è l'intervallo di tempo considerato [d]




L'evoluzione nella formazione dell'insieme dei granuli può essere seguito tramite il "tasso di granulazione", definito come la percentuale di granuli con diametro maggiore di un valore soglia, fissato da Hongbo Liu et al. (2012) in  $600\ \mu m$  e da De Kreuk et al. (2007) in  $400\ \mu m$ .




Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo



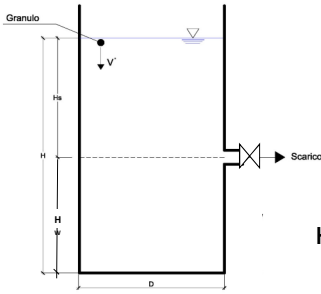


Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo



Schema di un impianto GSBR

Reattori a colonna "up-flow" con  
elevato rapporto H/D (6÷8, fino a 20)



Rapporto di scambio volumetrico, W:

$W = \frac{V_W}{V_T}$ , dove:


$V_W = \pi \frac{D^2}{4} \cdot H_s$ , volume scaricato ad ogni ciclo

$V_T = \pi \frac{D^2}{4} \cdot H$ , volume operativo del reattore


e allora si avrà che:

$HRT = \frac{V_T}{Q} = \frac{V_T}{V_W \cdot T^{-1}} = \frac{T}{W}$ , con T durata del ciclo

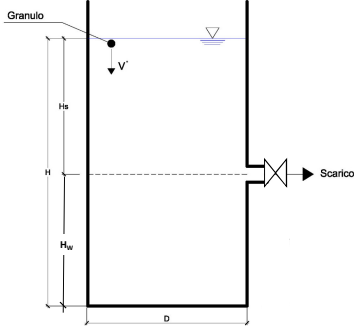
**W = 50÷70%**



Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo




Schema di un impianto GSBR




Tramite il tempo di sedimentazione  $t_s$  è possibile selezionare quali particelle ritenere all'interno del reattore e quali dilavare.

$v' \leq H_s / t_s$  dilavate

$v' > H_s / t_s$  ritenute

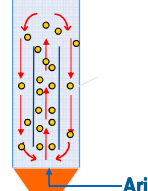


Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo



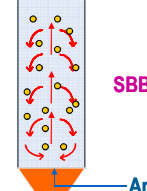
Schema di un impianto GSBR

SBAR (Sequencing Batch Airlift Reactor)



Aria

SBBC (Sequencing Batch Bubble Coloumn)




Aria


- ❖ Presenza di un "riser"
- ❖ Maggiore intensità degli sforzi di taglio nelle zone di inversione del flusso

La formazione dei granuli è più rapida negli SBAR.  
I granuli risultano leggermente più piccoli ma sono strutturalmente più resistenti.

- ❖ Assenza del "riser"
- ❖ Minore intensità degli sforzi di taglio più omogeneamente distribuiti

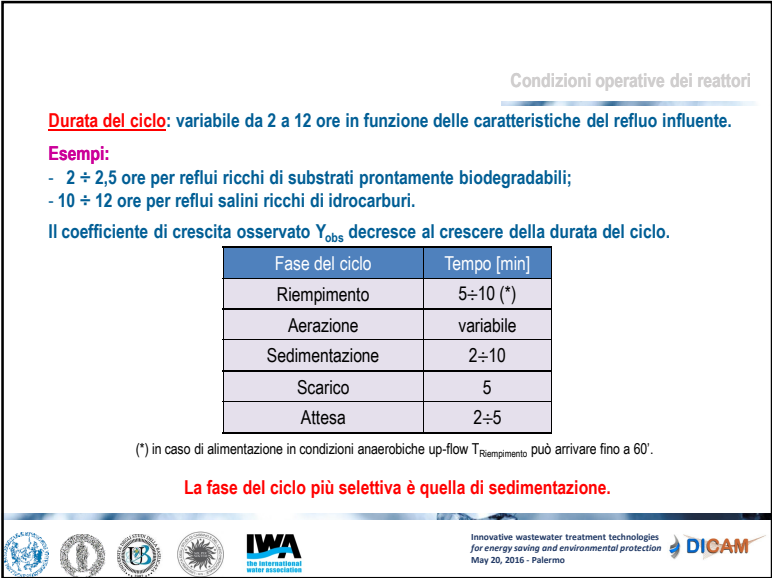
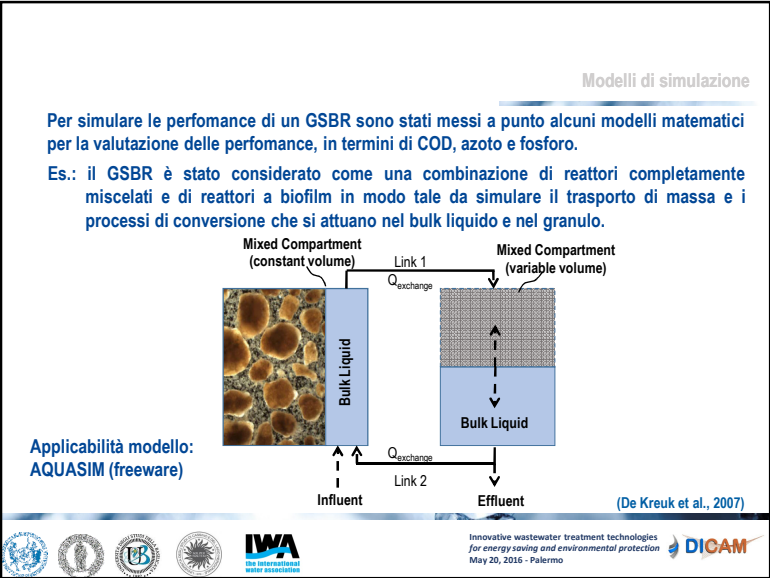
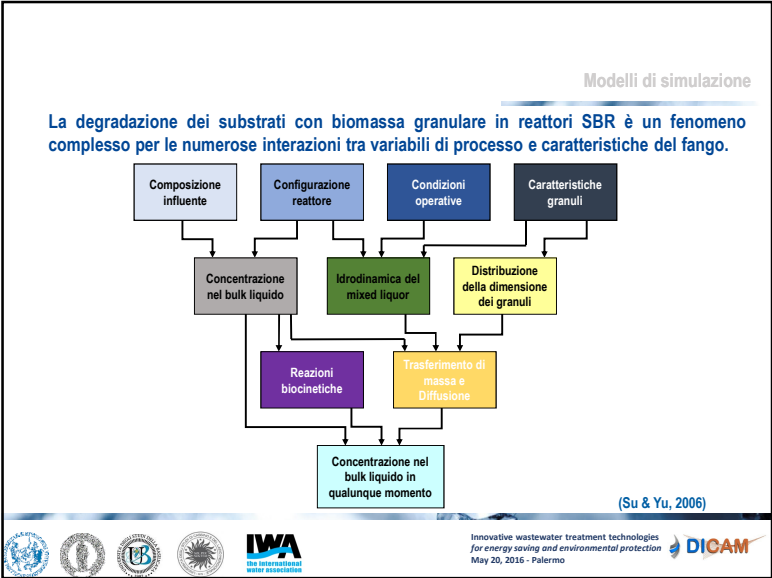
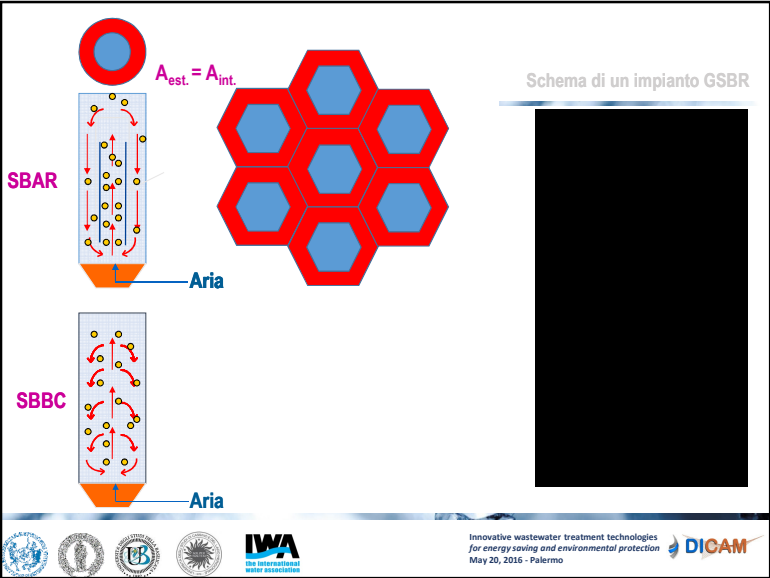


Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo



Michele Torregrossa

7





Condizioni operative dei reattori

**Intensità dell'aerazione:** per velocità di flusso ascensionale dell'aria immessa comprese tra  $2,4$  a  $3,2\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  i granuli possono mantenere una struttura robusta e stabile.  
Tra  $0,8$  e  $1,6\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  i granuli si deteriorano in strutture ampie, irregolari e filamentose.  
La concentrazione di O.D. va mantenuta, comunque  $> 2\text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$

**Caratteristiche del substrato e carico organico volumetrico applicato:**  
I granuli aerobici sono stati coltivati con un'ampia varietà di reflui.  
Generalmente, la granulazione aerobica è indipendente dal tipo di substrato.  
Tuttavia dalla composizione del refluo dipendono la morfologia e la microstruttura dei granuli.  
Es.: - reflui caseari inducono una morfologia con escrescenze filamentose;  
- reflui ricchi di glucosio mostrano una struttura filamentosa;  
- reflui ricchi di acetato non mostrano morfologia filamentosa e i granuli sono molto compatti.

La dimensione dei granuli varia in funzione del OLR applicato:  
per valori di OLR che passa da  $3$  a  $9\text{ kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{giorno}^{-1}$ , i granuli incrementano la loro dimensione media da  $1,6$  a  $1,9\text{ mm}$ .  
All'aumentare di OLR, i granuli diventano meno stabili.

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

Condizioni operative dei reattori

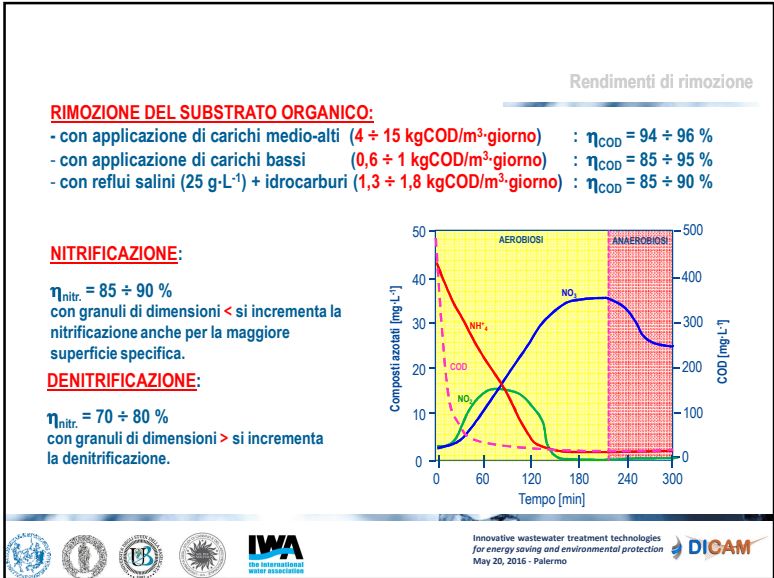
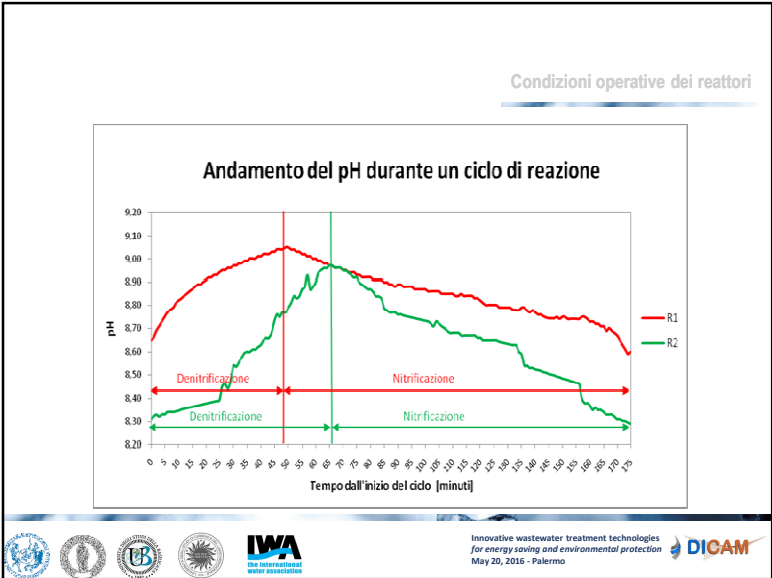
**Carichi applicati:**  
Applicazioni più frequenti: carichi medio-alti.  
“.....è possibile ottenere la granulazione con bassi carichi?” (reflui urbani) .....  
Le esperienze fatte portano a concludere che anche per bassi carichi è possibile ottenere un buon livello di granulazione e ottime efficienze di rimozione di C e N.

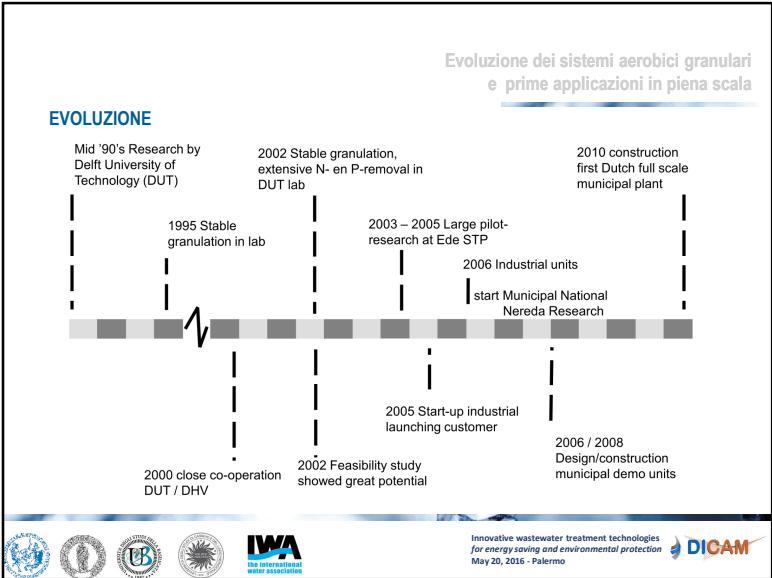
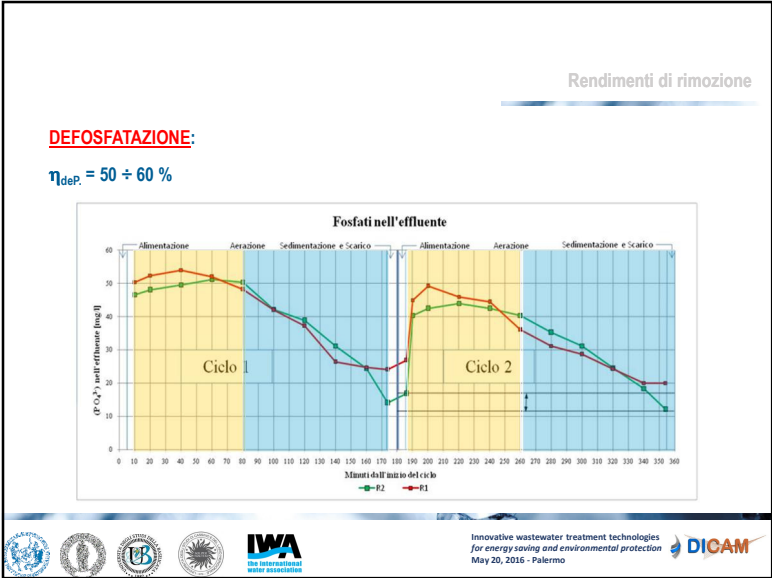
**Il carico organico (OLR) applicabile va da  $0,4$  a  $15\text{ kgCOD}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{giorno}^{-1}$ .**

**Temperatura:** non ci sono particolari restrizioni operative. Tuttavia i tempi di maturazione dei granuli sono più brevi a temperature elevate, quindi si preferisce effettuare lo start-up degli impianti in periodo estivo.

**pH:**  
- a pH bassi si ha sviluppo di funghi filamentosi.  
- a pH  $>8$  di velocità la formazione dei granuli → **regolazione pH nel reattore = strategia di coltivazione.**

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo





Evoluzione dei sistemi aerobici granulari  
e prime applicazioni in piena scala

EPE (Olanda): 59.000 A.E. – 1.500 m³/h



Consumi energetici accertati ad oggi:  
22,2 kWh/A.E. x anno


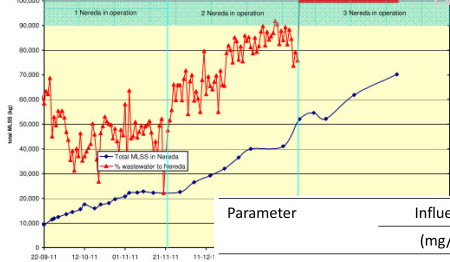
media: 0,35 kWh/kgCOD rimosso

contro una media di consumo degli  
impianti olandesi di 33,4 kWh/ A.E. x anno




Evoluzione dei sistemi aerobici granulari  
e prime applicazioni in piena scala

FPE (The Netherlands): 50 000 A.E. – 1 500 m³/h




Parameter	Influent (mg/l)	Effluent (Average) (mg/l)
COD	879	27
BOD	333	< 2.0
NKj	77	1.4
NH4-N	54	0.1
N-total		< 4.0
P-total	9.3	0.3
Suspended Solids	341	< 5.0

Parameter	Influent (kg/d)	Effluent limits (mg/l)
COD	5,420	
BOD	2,230	7
Kj-N	570	
TN	570	5
TP	61	0.3
TSS	2,120	30
pH	5-10	6-9





Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo



Evoluzione dei sistemi aerobici granulari  
e prime applicazioni in piena scala


GARMERWOLDE (Olanda): 40.000 A.E.  
portata max nera 4.200 m³/h






Evoluzione dei sistemi aerobici granulari  
e prime applicazioni in piena scala

GANSBAAI (Sud Africa): portata 4.000 m³/giorno





Evoluzione dei sistemi aerobici granulari  
e prime applicazioni in piena scala



Scarichi industriali:



Impianto in UK (Imtech)

Industria casearia VIKÅ  
(Olanda)

Attualmente sono in corso di attivazione impianti di trattamento a servizio di industrie farmaceutiche in Slovenia e Ungheria.



IWA  
the International Water Association

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo



Grazie per l'attenzione



IWA  
the International Water Association

Innovative wastewater treatment technologies  
for energy saving and environmental protection  
May 20, 2016 - Palermo

