

**XXVII**  
**EXPOSIÇÃO DE**  
**EXPERIÊNCIAS**  
**MUNICIPAIS EM**  
**SANEAMENTO**



Realização:



*DESIDRATAÇÃO DE LODO DE ETAs CONVENCIONAIS*

*COM UTILIZAÇÃO DE SPRAY-DRYER*

*Autores*

*Arnaldo Sarti*

*Maria Rosa das Neves Nunes Muci*

*Brenda Clara Gomes Rodrigues*

*Bruna Sampaio de Mello*

*Samuel Conceição de Oliveira*

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Araraquara

unesp 



# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Introdução

- Samuel Percy (1872) primeiros experimentos de secagem de soluções de dextrina, amido e gelatina (↓ teor de umidade)
- Aplicação industrial (século XX):

*Robert Stauf (1901) e Merrell-Soule (1919): modernizaram os bicos de atomização de pressão com grande importância para a preservação de sangue, leite e outros líquidos pela transformação em pó.*

- Avanço no uso de secadores por spray ocorreu durante e após a Segunda Guerra Mundial

*Redução de peso e volume de alimentos (preservação) para alimentação de soldados e tratamento de soldados feridos.*

- *Alimentos em pó como leite, ovos, sopas, sucos e outros alimentos enriquecidos com vitaminas e minerais.*
- *Medicamentos e produtos farmacêuticos, especialmente antibióticos e vitaminas*

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Introdução

Atualmente, o *spray-dryer* é amplamente aplicado em três principais áreas.

Indústria alimentícia: produção de leite em pó, café, chá, ovos, cereais, especiarias, aromatizantes, sangue, amido e derivados de amido, vitaminas, enzimas, sopas, corantes, ração animal (levedura), etc..

Indústria farmacêutica: produção de antibióticos, ingredientes médicos e vacinas, pós de maquilagem entre outros.

Indústria química: produção de pigmentos de tintas, materiais cerâmicos, catalisadores entre outros.

Secagem via *spray-dryer* definida como padrão pode ser composta por quatro estágios específicos:

- (a) atomização pela dispersão de sólidos;
- (b) evaporação de solvente;
- (c) formação de pequenas partículas;
- (d) separação das partículas em pó (produto).

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO

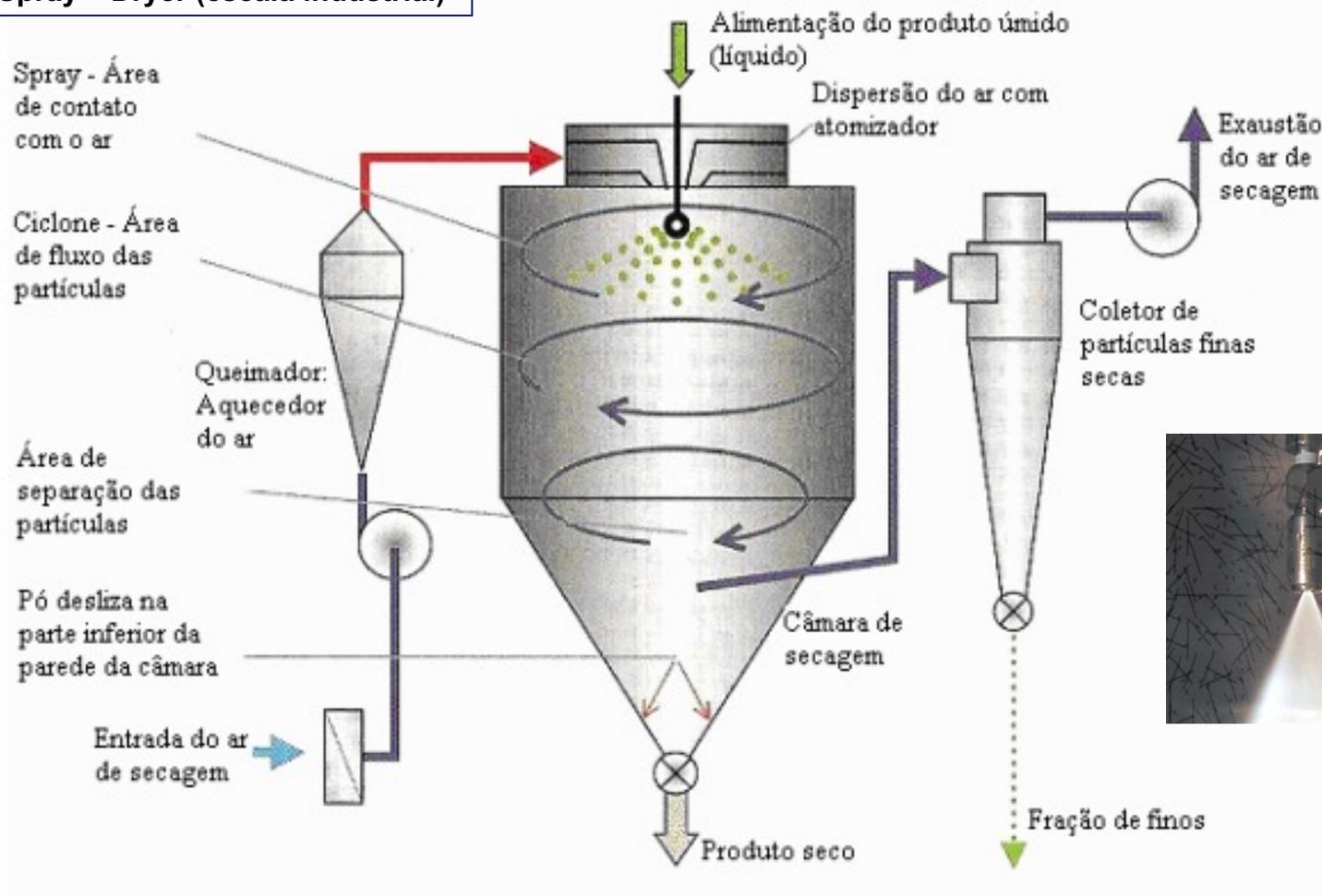
**52º CNSA**  
CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO DA ASSEMAE

20 a 24 de Maio de 2024  
RIBEIRÃO PRETO • SÃO PAULO

Realização:

**40 anos**  
assemæ  
Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento

## Spray – Dryer (escala industrial)



Fonte. Adaptado de MASTERS (2002).

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO

**52º CNSA**  
CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO DA ASSEMAE  
20 a 24 de Maio de 2024  
RIBEIRÃO PRETO • SÃO PAULO

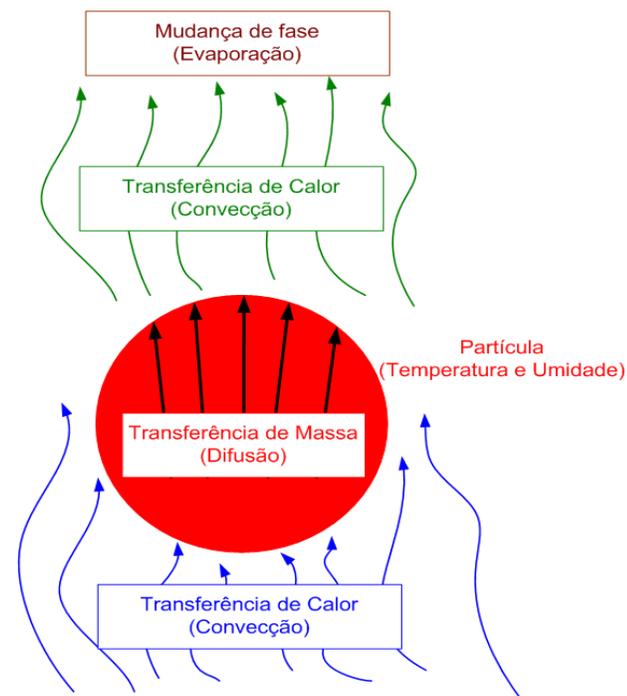
Realização:

**assemae 40 anos**  
Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento



Fonte. <https://drymaster.webnode.page/home/>

## Transferência de massa e calor no processo de secagem por atomização



### Vantagem principal

Fonte. Autor (2023).

*Baixo tempo de exposição ao calor ou seja reduzida permanência para secagem do produto (reduzida degradação produto).*

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Introdução

**Lodo de ETA** é classificado como um material não perigoso e não inerte pertencente à Classe II A, conforme a norma NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004).

- Lodos gerados nos decantadores e filtros possuem características variadas e quantidades dependentes:

a) Condições da água bruta (turbidez)

b) Produtos químicos utilizados (coagulantes) e suas dosagens

c) Forma de limpeza dos decantadores e filtros.

- *Lodo proveniente dos decantadores está entre 60 a 95% do total de lodo gerado, e da água de lavagem dos filtros varia de 5 a 40%.*
- *Resíduo gerado nos decantadores pode ter concentração de sólidos variável (0,1% - 4,0%), de acordo com o tipo de decantador, modo de descarga e frequência de limpeza.*
- *Lodo da água de lavagem de filtros possui concentração de sólidos menor (0,01% - 0,1%).*

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Introdução

### Alternativas para o destino final do lodo de ETAs

- *Lançamento do lodo de ETAs nos cursos d'água reduzido em função das legislações mais rigorosas de controle e das consequências do descarte sistemático desses resíduos (meio ambiente).*
- *Recomposição de solos*
- *Matriz de concreto e indústria cerâmica.*

### Disposição em aterros sanitários ou aterros exclusivos

- 1) **Condicionamento químico (floculação/polímero) com adensamento (decantadores);**
- 2) **sistemas naturais de evaporação (lagoa de lodo ou leito de secagem);**
- 3) **sistemas mecânicos como centrífugas, filtro-prensa ou prensa desaguadora;**
- 4) **Uso de “bags” ou “geobags” (bolsas filtrantes).**

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO

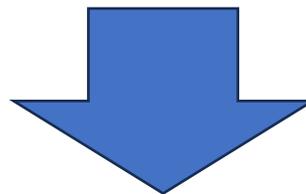


Realização:



## Objetivos

- Emprego de secagem por atomização por **spray-dryer** em escala laboratorial a fim de definir, por meio de técnicas estatísticas de planejamento de experimentos, as melhores condições operacionais para a secagem de lodo proveniente de decantadores de ETA convencional usando o flocculante **sulfato de alumínio ferroso**.



Desenvolver **metodologia** de testes para as principais variáveis independentes (variáveis de entrada) como **concentração de sólidos (%)**, **temperatura e vazão do fluido de alimentação e temperatura do ar de secagem** que podem **intervir** no processo, especificamente sobre a **umidade final** do produto (variável de resposta).

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Material e métodos

- O lodo coletado (50 L) de decantadores foi mantido por uma semana para a sedimentação da fase sólida. Com a fase sólida realizou-se a análise em triplicata para determinação da concentração de sólidos totais (ST) conforme APHA (2005).
- Análises referentes a metais presentes no lodo úmido e após secagem (pó) foram realizadas, bem como DQO e pH do lodo úmido segundo metodologia de APHA (2005).
- *Planejamento Experimentos (ensaios com duração de 1 h)*

Variáveis de entrada que apresentam maior interferência no processo de secagem:

- 1) vazão de ar entrada (0 – 85 m<sup>3</sup>/h)
- 2) temperatura do ar de secagem (0 – 250 °C)
- 3) Concentração de sólidos do produto (lodo)

Variável de saída: Umidade final (pó)

Obs. Mantida constante a vazão de alimentação (0,5 L/h) do lodo e a temperatura inicial do lodo a ser secado 25±2 °C (temperatura da sala).

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Material e métodos

As três variáveis avaliadas em cinco níveis (+1,68; +1; 0; -1; -1,68) foram a **temperatura do ar alimentado**, **vazão de ar** e **concentração de sólidos** do lodo totalizando 18 experimentos realizados de maneira aleatória realizados em duplicata.

O planejamento fatorial de experimentos foi do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR) seguido de metodologia de superfície de resposta, a qual foi empregada para desenvolver um modelo matemático ajustado aos dados experimentais obtidos.

Software Statistica® (versão 9.0) usado para análise dos dados da variável de resposta (umidade) obtidos nas condições programadas pelo DCCR, incluindo o desenvolvimento de modelo matemático associado ao planejamento

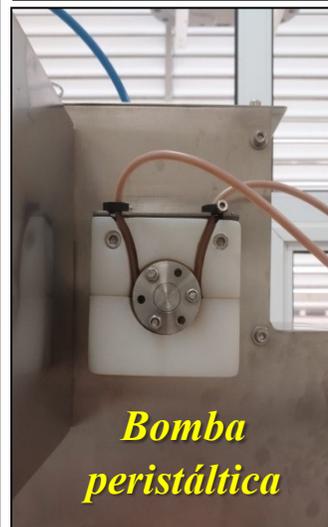
# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO

**52° CNSA**  
CONGRESSO NACIONAL DE  
SANEAMENTO  
DA ASSEMAE

20 a 24 de Maio de 2024  
RIBEIRÃO PRETO • SÃO PAULO

Realização:

**40**  
assembléias  
anos  
Associação Nacional dos Serviços  
Municipais de Saneamento



# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Resultados e discussão

Ensaio	Fatores (níveis real e codificado)					
	Temperatura (°C)		$Q_{ar}$ (m³/h)		Teor de sólidos (%)	
	Real	Codificado	Real	Codificado	Real	Codificado
1	150	-1,00	45,0	-1,00	1,50	-1,00
2	133	-1,68	60,0	0,00	2,50	0,00
3	175	0,00	60,0	0,00	2,50	0,00
4	175	0,00	60,0	0,00	2,50	0,00
5	175	0,00	60,0	0,00	0,80	-1,68
6	217	1,68	60,0	0,00	2,50	0,00
7	200	1,00	75,0	1,00	1,50	-1,00
8	150	-1,00	75,0	1,00	1,50	-1,00
9	200	1,00	40,0	-1,00	3,50	1,00
10	175	0,00	60,0	0,00	2,50	0,00
11	200	1,00	75,0	1,00	3,50	1,00
12	150	-1,00	45,0	-1,00	3,50	1,00
13	200	1,00	45,0	-1,00	1,50	-1,00
14	175	0,00	60,0	0,00	4,20	1,68
15	175	0,00	35,0	-1,68	2,50	0,00
16	150	-1,00	75,0	1,00	2,65	1,00
17	175	0,00	85,0	1,68	2,50	0,00
18	175	0,00	60,0	0,00	2,50	0,00

**Matriz de planejamento das condições dos ensaios de secagem**

- Temperatura ar secagem
- vazão de ar ( $Q_{ar}$ )
- teor de sólidos

➔ **Concentração de sólidos do lodo coletado (35.000 mgST/L)**

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO

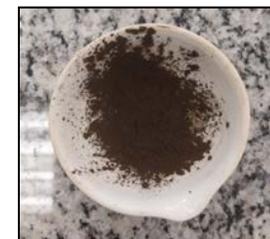


Realização:



**Valores médios de umidade final do pó (seco) obtidos após secagem do lodo em cada condição experimental programada do Planejamento de Experimentos.**

Ensaio	Fatores e níveis						Umidade Final (%)
	Temperatura (°C)		$Q_{ar}$ (m³/h)		Teor de sólidos (%)		
	Real	Codificado	Real	Codificado	Real	Codificado	
1	150	-1,00	45,0	-1,00	1,50	-1,00	10,67
2	150	-1,00	45,0	-1,00	3,50	1,00	10,72
3	150	-1,00	75,0	1,00	1,50	-1,00	7,51
4	150	-1,00	75,0	1,00	3,50	1,00	6,07
5	200	1,00	45,0	-1,00	1,50	-1,00	8,27
6	200	1,00	45,0	-1,00	3,50	1,00	10,0
7	200	1,00	75,0	1,00	1,50	-1,00	6,44
8	200	1,00	75,0	1,00	3,50	1,00	5,75
9	133	-1,68	60,0	0,00	2,50	0,00	8,69
10	217	1,68	60,0	0,00	2,50	0,00	6,18
11	175	0,00	35,0	-1,68	2,50	0,00	18,89
12	175	0,00	85,0	1,68	2,50	0,00	6,74
13	175	0,00	60,0	0,00	0,80	-1,68	5,20
14	175	0,00	60,0	0,00	4,20	1,68	8,15
15	175	0,00	60,0	0,00	2,50	0,00	8,28
16	175	0,00	60,0	0,00	2,50	0,00	8,14
17	175	0,00	60,0	0,00	2,50	0,00	8,69
18	175	0,00	60,0	0,00	2,50	0,00	8,09



# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO

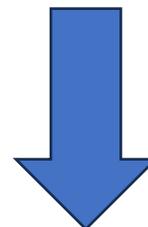


Realização:



## Resultados e discussão

*Software Statistica® (versão 9.0) para análise dos dados da variável de resposta (U - umidade)*



Ajuste de modelo matemático polinomial de 2ª ordem para umidade final do lodo (U)

$$U = 8,29 - 0,64.X_1 - 0,24.X_1^2 - 1,73.X_2 + 0,53.X_2^2 + 0,34.X_3 - 0,51.X_3^2 - 0,49.X_2 \cdot X_3$$

**Onde:**

**$X_1$  (temperatura ar de secagem)**

**$X_2$  (vazão de ar de secagem)**

**$X_3$  (teor de sólidos na alimentação de lodo úmido)**

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Resultados e discussão

$$U = 8,29 - 0,64.X_1 - 0,24.X_1^2 - 1,73.X_2 + 0,53.X_2^2 + 0,34.X_3 - 0,51.X_3^2 - 0,49.X_2.X_3$$

otimização do processo de secagem:

**Determinar as condições operacionais para minimizam a umidade final do lodo**

$$\frac{dU}{dX_1} = -0,64 - 0,48.X_1 = 0$$

$X_1$  (temperatura ar de secagem)

$$\frac{dU}{dX_2} = -1,73 + 1,06.X_2 - 0,49.X_3 = 0$$

$X_2$  (vazão de ar de secagem)

$$\frac{dU}{dX_3} = +0,34 - 1,02.X_3 - 0,49.X_2 = 0$$

$X_3$  (teor de sólidos do lodo)

Resolução  
de  
sistemas  
lineares

$$T_{secagem} = 142 \text{ °C}$$

$$Q_{ar} = 82 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$W_s = 2,13 \%$$

“Modelo” (U - umidade)

$$U = 7,39\%$$

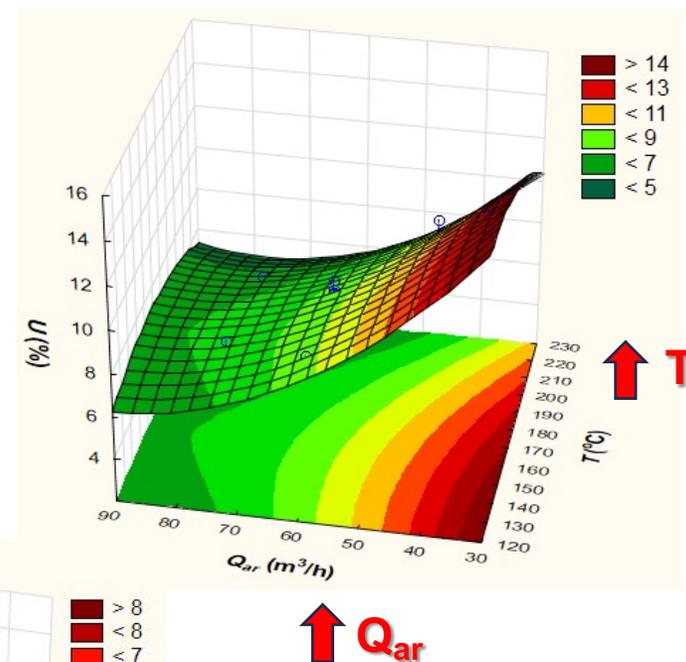
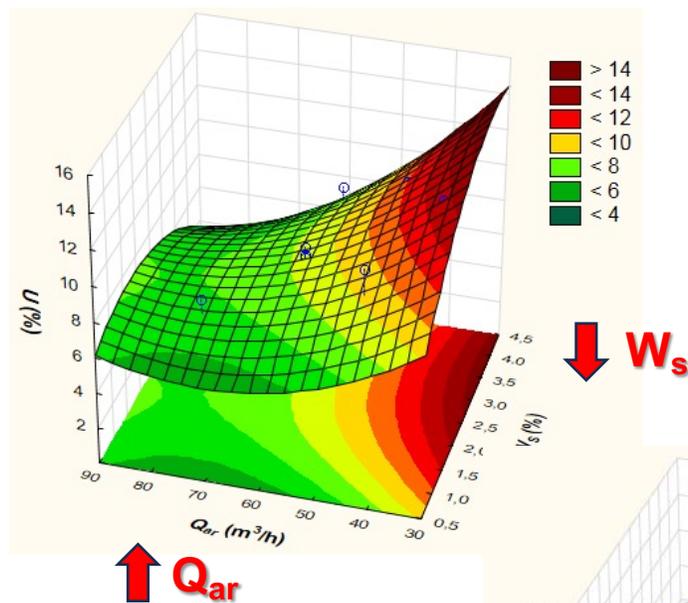
# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



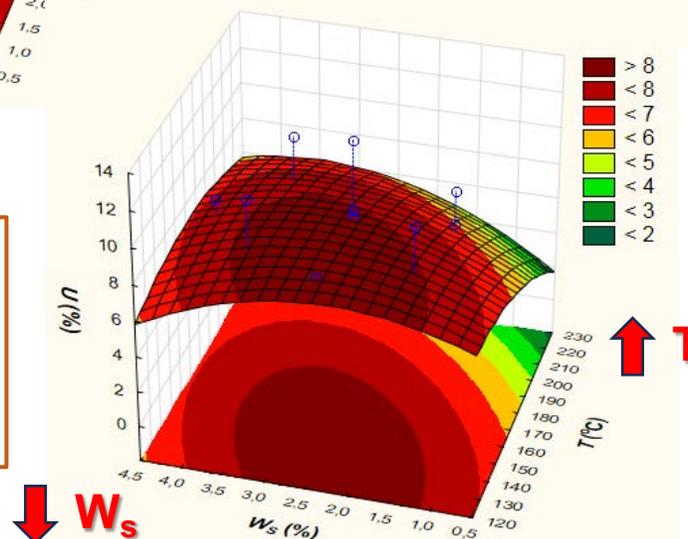
Realização:



## Resultados e discussão



Superfícies de resposta do processo de secagem em *spray-dryer*



Onde:  
 $U$  (umidade)  
 $T$  (temperatura do ar)  
 $W_s$  (teor de sólidos)  
 $Q_{ar}$  (vazão de ar)

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



Associação Nacional dos Serviços  
Municipais de Saneamento

## Resultados e discussão

### Análise de metais no lodo (líquido) com 2,13% (concentração de sólidos)

Parâmetros	Valores (mg L <sup>-1</sup> )	Limite Detecção	Método de referencia*
ALUMÍNIO	789,0	0,010	SMWW 3111 D
ANTIMÔNIO	0,339	0,005	SMWW 3111 B
BÁRIO	0,460	0,050	SMWW 3111 D
CÁDMIO	0,091	0,0006	SMWW 3111 B
CÁLCIO	53,84	0,001	SMWW 3111 D
CHUMBO	0,450	0,010	SMWW 3111 B
COBALTO	0,184	0,007	SMWW 3111 B
COBRE	0,441	0,003	SMWW 3111 B
CROMO	0,335	0,005	SMWW 3111 B
FERRO TOTAL	754,0	0,005	SMWW 3111 B
MAGNÉSIO	12,38	0,001	SMWW 3111 B
MANGANÊS	12,16	0,003	SMWW 3111 B
NÍQUEL	0,402	0,008	SMWW 3111 B
POTÁSSIO	2,900	0,100	SMWW 3500 KB
PRATA	< LD	0,001	SMWW 3111 B
SÓDIO	2,600	0,100	SMWW 3500 NaB
ZINCO	0,703	0,0020	SMWW 3111 B

\* APHA (2005)

pH = 7,2 e DQO = 187 mg/L

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



Associação Nacional dos Serviços  
Municipais de Saneamento

## Resultados e discussão

Análise de metais no produto seco (pó) a partir do lodo com 2,13 % (teor de sólidos)

Parâmetros	Valores (mg/kg)	Limite Detecção	Método de referencia*
ALUMÍNIO	86.936	1,00	SMWW 3111 D
ANTIMÔNIO	31,76	0,50	SMWW 3111 B
BÁRIO	60,58	5,00	SMWW 3111 D
CÁDMIO	6,530	0,06	SMWW 3111 B
CÁLCIO	4.582	0,10	SMWW 3111 D
CHUMBO	49,41	1,00	SMWW 3111 B
COBALTO	30,47	0,70	SMWW 3111 B
COBRE	53,41	0,30	SMWW 3111 B
CROMO	37,47	0,50	SMWW 3111 B
FERRO TOTAL	84.113	0,50	SMWW 3111 B
MAGNÉSIO	1.016	0,10	SMWW 3111 B
MANGANÊS	1.635	0,30	SMWW 3111 B
NÍQUEL	37,88	0,80	SMWW 3111 B
POTÁSSIO	253,0	10,0	SMWW 3500 KB
PRATA	< LD	0,10	SMWW 3111 B
SÓDIO	229,0	10,0	SMWW 3500 NaB
ZINCO	132,76	0,20	SMWW 3111 B

\* APHA (2005).

$T_{secagem} = 142 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$Q_{ar} = 82 \text{ m}^3/\text{h}$

$W_s = 2,13 \%$

$U_{final} = 6,74\%$



$U_{otimizada} = 7,39\%$

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Conclusões

- Viabilidade de secagem de lodo “*in natura*” de ETA convencional com o uso de *spray-dryer* foi comprovada.
- Secagem do lodo nas condições propostas gerou produto em pó de baixa umidade (5,2 - 18,9%) e alto teor de sólidos (94,8 - 88,1%).
- Metodologia de Planejamento proporcionou um menor número de ensaios e definiu parâmetros específicos otimizados para secagem de lodo.

teor de sólidos (1,5 a 4,2%)

$T_{secagem} = 142 \text{ °C}$

$Q_{ar} = 82 \text{ m}^3/\text{h}$

$Teor \text{ sólidos} = 2,13 \%$

**Umidade = 7,39%**

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Recomendações

- Aumento de escala do equipamento para testes em maiores quantidades.
- Analisar as possibilidades de uso ou de descarte do produto seco com volume reduzido (recomposição de solo, materiais cerâmicos etc...)

### - Balances de massa e energia

a) Para teor de sólidos (1,5 a 4,2%)

1.000 kg lodo úmido = 30 a 50 kg lodo seco (pó)

0,247 kg lodo úmido /kW

(verificar com aumento de escala)

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Referências

APHA. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (A. D. Eaton & M. A. H. Franson, Orgs.; Illustrated, Vol. 21). APHA-AWWA-WEF.

MASTERS, K. *Spray Drying in Practice*; Spray Dry Consult Inc. Denmark, 2002.

PERCY, S. *Improvement in drying and concentrating liquid substances by atomizing.* . United States of America: [s.n.] , 1872.

# XXVII EXPOSIÇÃO DE EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO



Realização:



## Agradecimentos

- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo 2021/06961-9).

# **XXVII** **EXPOSIÇÃO DE** **EXPERIÊNCIAS** **MUNICIPAIS EM** **SANEAMENTO**

---



Realização:



**OBRIGADO!**

**Prof. Dr. Arnaldo Sarti**  
**(016) 3301-9860**  
**arnaldo.sarti@unesp.br**