

## 4

# Apresentação e Discussão dos Resultados

### 4.1. Biodegradação

Os primeiros ensaios de tratabilidade foram realizados apenas com o uso de lodo ativado, visando promover a degradação biológica dos compostos orgânicos presentes nos efluentes. No total, foram realizados 4 ensaios, sendo que a metodologia de cada um deles foi sendo modificada gradativamente, de acordo com os resultados obtidos.

#### 4.1.1. Ensaio 1

Para o primeiro ensaio, antes do início, o lodo recebeu uma mistura de nutrientes e ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), como fonte de carbono. A mistura de nutrientes incluía as seguintes substâncias:

- Fosfato monopotássico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) – 4 g/L
- Fosfato de Sódio ( $\text{NaHPO}_4$ ) – 4 g/L
- Cloreto de Amônio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) – 2 g/L
- Cloreto de Magnésio ( $\text{MgCl}_2$ ) – 0,2 g/L
- Sulfato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) – 1,42 g/L
- Cloreto de Cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) – 0,006 g/L
- Cloreto de Ferro ( $\text{FeCl}_2$ ) – 0,001 g/L

A escolha destes nutrientes é fruto da experiência do laboratório do *Institute of Sanitary and Environmental Engineering*, no desenvolvimento de técnicas avançadas de tratamento biológico de águas residuais.

Antes da adição dos nutrientes, foi coletada uma amostra do lodo ativado para determinação da DQO. A medição foi realizada tanto para a amostra completa quanto para a amostra filtrada, de forma a verificar a fração de DQO oriunda das partes líquida e sólida. O resultado, apresentado na Tabela 4.1,

indicou que quase 98% da DQO medida era oriunda da fração sólida do lodo ativado.

**Tabela 4.1: DQO do lodo ativado - Ensaio 1**

Identificação	Data	Diluição	DQO (mg/L)
Lodo ativado – filtrado	13/02/2012	-	110
Lodo ativado - total	13/02/2012	-	3933

Visando a aclimatação das bactérias, os reatores foram preparados no dia 14 de fevereiro de 2012 e o sistema de aeração permaneceu ligado até a data de início do ensaio, em 15 de fevereiro.

O reator 1 foi preenchido com 3 litros de água deionizada, enquanto o reator 2 foi preenchido com 3 litros do lodo ativado. Cada um dos reatores recebeu 100 (cem) microlitros de cada um dos compostos orgânicos monoaromáticos – Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e o-Xileno – e 100 (cem) mililitros de uma solução de Naftaleno, com concentração de 30 mg/L. As concentrações foram escolhidas visando simular um efluente típico de uma área contaminada por gasolina. A adição dos compostos orgânicos ocorreu às 10:00 do dia 15/02/2012. A Tabela 4.2 apresenta a massa adicionada, em cada reator, de cada um dos compostos orgânicos.

**Tabela 4.2: Massa adicionada dos compostos orgânicos - Ensaio 1**

Composto	Peso molecular (g/cm <sup>3</sup> )	Volume adicionado (mL)	Massa adicionada (mg)
Benzeno	0,88	0,100	88
Tolueno	0,87	0,100	87
Etilbenzeno	0,87	0,100	87
o-Xileno	0,86	0,100	86
Solução de Naftaleno	-	100	3

Através das análises de DQO, é possível verificar que os valores no reator 2 foram muito elevados, superando as expectativas e o limite dos testes de cubeta utilizados. Isso provavelmente ocorreu em função de uma degradação incompleta do ácido acético utilizado como fonte de carbono durante o período de

aclimatação. Sendo assim, a avaliação da biodegradação foi prejudicada, uma vez que o incremento da DQO, pela adição dos compostos orgânicos, foi muito baixo quando comparado com o valor total no reator 2. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4.

**Tabela 4.3: Ensaio 1 - Reator 1**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
A+ORG t=1	15.02.2012	10:00	0	117
A+ORG t=2	15.02.2012	10:15	0,25	122
A+ORG t=3	15.02.2012	10:30	0,5	76,3
A+ORG t=4	15.02.2012	10:45	0,75	32,1
A+ORG t=5	15.02.2012	11:00	1	30,7
A+ORG t=6	15.02.2012	11:30	1,5	30
A+ORG t=7	15.02.2012	12:00	2	30,9
A+ORG t=8	15.02.2012	12:30	2,5	26,8
A+ORG t=9	15.02.2012	13:00	3	30,2
A+ORG t=10	15.02.2012	14:00	4	27,6

A: Água; ORG: Compostos Orgânicos; DQO: Demanda química de oxigênio.

**Tabela 4.4: Ensaio 1 - Reator 2**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
LA+ORG filtrado t=0	15.02.2012	9:00	-	8630
LA+ORG filtrado t=1	15.02.2012	10:00	0	7569
LA+ORG filtrado t=2	15.02.2012	10:15	0,25	7716
LA+ORG filtrado t=3	15.02.2012	10:30	0,5	>2322
LA+ORG filtrado t=4	15.02.2012	10:45	0,75	>2106
LA+ORG filtrado t=5	15.02.2012	11:00	1	>2353
LA+ORG filtrado t=6	15.02.2012	11:30	1,5	>2356
LA+ORG filtrado t=7	15.02.2012	12:00	2	>2268
LA+ORG filtrado t=8	15.02.2012	12:30	2,5	>2388
LA+ORG filtrado t=9	15.02.2012	13:00	3	>2320
LA+ORG filtrado t=10	15.02.2012	14:00	4	>2376

LA: Lodo ativado; ORG: Compostos Orgânicos; DQO: Demanda química de oxigênio.

#### 4.1.2. Ensaio 2

No segundo ensaio, depois de coletado, o lodo ativado não recebeu o ácido acético antes do início do teste, de forma a não promover o incremento da DQO no reator. Assim como realizado no primeiro teste, o lodo ativado foi analisado antes do início do teste, de forma a conhecer o valor inicial de DQO, tanto na amostra filtrada quanto na amostra completa. Os resultados são apresentados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5: DQO do lodo ativado - Ensaio 2**

Identificação	Data	Hora	DQO (mg/L)
Lodo ativado – filtrado	15.02.2012	16:15	103
Lodo ativado – total	15.02.2012	16:15	4606

Cada reator foi preenchido com 2,4 litros, sendo utilizada água deionizada no reator 1 e o lodo ativado no reator 2. Cada um dos reatores recebeu 500 mililitros de cada um dos compostos orgânicos monoaromáticos – Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e o-Xileno. Neste teste, o Naftaleno não foi utilizado, em função de sua baixa solubilidade, o que fez com que, no primeiro ensaio, a massa de Naftaleno adicionada ao reator fosse desprezível quando comparada com os outros 4 compostos.

A Tabela 4.6 apresenta a massa adicionada de cada um dos compostos em cada reator.

**Tabela 4.6: Massa adicionada dos compostos orgânicos - Ensaio 2**

Composto	Peso molecular (g/cm <sup>3</sup> )	Volume adicionado (mL)	Massa adicionada (mg)	Limite de Solubilidade (g/L)* <sup>1</sup>
Benzeno	0,88	0,500	440	1,77 (a 25 °C)
Tolueno	0,87	0,500	435	0,53 (a 25 °C)
Etilbenzeno	0,87	0,500	435	0,16 (a 25 °C)
o-Xileno	0,86	0,500	430	0,17 (a 25 °C)

(\*1) Fonte: Lide, 1996.

Em função de uma possível extrapolação dos limites de solubilidade dos compostos em água, os quais são apresentados na Tabela 4.6, uma fase livre não

aquosa foi formada sobre os níveis de água e lodo ativado nos reatores. De forma a promover a continuidade do teste, novos reatores foram preenchidos, utilizando-se apenas a fração aquosa, a qual foi separada com o auxílio de um decantador.

As análises efetuadas indicaram um incremento dos valores de DQO no reator 1, ao longo do ensaio. Isso provavelmente ocorreu em função de uma limpeza inadequada da placa de aeração, a qual provavelmente estava impregnada com a fase livre não aquosa dos compostos orgânicos, formada no início do ensaio. Com isso, à medida que o ar passava pela placa, os compostos foram sendo liberados, elevando assim a DQO no reator.

Apesar disso, no reator 2, onde havia o lodo ativado, foi possível perceber uma significativa redução no valor de DQO. Após 4 horas e 50 minutos de ensaio, a redução observada foi de 45,4%, e em 22 horas a redução chegou a 54,5%. Observa-se, no entanto, a tendência de estabilização no valor de DQO, após 4 horas de ensaio, conforme é possível observar na Figura 4.1.

Os resultados obtidos no segundo ensaio são apresentados na Tabela 4.7 e na Tabela 4.8.

**Tabela 4.7: Ensaio 2 - Reator 1**

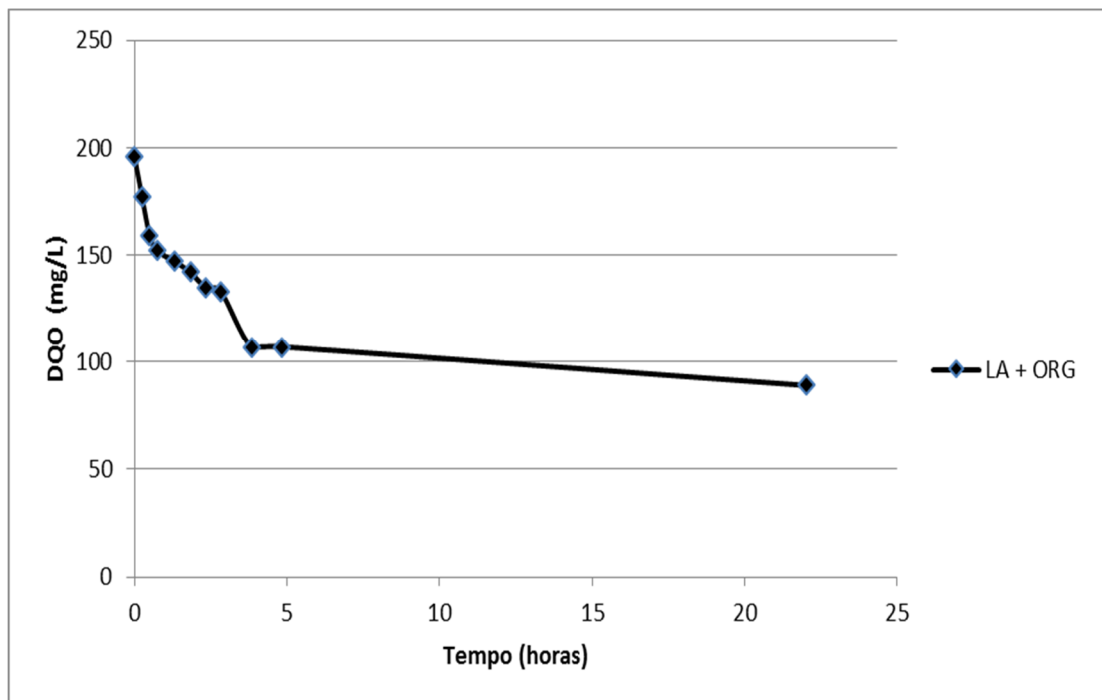
Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
A+ORG 1	16.02.2012	11:30	0	202
A+ORG 2	16.02.2012	11:45	0,25	2681
A+ORG 3	16.02.2012	12:00	0,5	2775
A+ORG 4	16.02.2012	12:15	0,75	2846
A+ORG 5	16.02.2012	12:50	1,33	3018
A+ORG 6	16.02.2012	13:20	1,83	3185
A+ORG 7	16.02.2012	13:50	2,33	3001
A+ORG 8	16.02.2012	14:20	2,83	3050
A+ORG 9	16.02.2012	15:20	3,83	2905
A+ORG 10	16.02.2012	16:20	4,83	2862
A+ORG 11	17.02.2012	9:30	22	2862

A: Água; ORG: Compostos Orgânicos; DQO: Demanda química de oxigênio.

**Tabela 4.8: Ensaio 2 - Reator 2**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
LA+ORG filtrado 1	16.02.2012	11:30	0	196
LA+ORG filtrado 2	16.02.2012	11:45	0,25	177
LA+ORG filtrado 3	16.02.2012	12:00	0,5	159
LA+ORG filtrado 4	16.02.2012	12:15	0,75	152
LA+ORG filtrado 5	16.02.2012	12:50	1,33	147
LA+ORG filtrado 6	16.02.2012	13:20	1,83	142
LA+ORG filtrado 7	16.02.2012	13:50	2,33	135
LA+ORG filtrado 8	16.02.2012	14:20	2,83	133
LA+ORG filtrado 9	16.02.2012	15:20	3,83	107
LA+ORG filtrado 10	16.02.2012	16:20	4,83	107
LA+ORG filtrado 11	17.02.2012	9:30	22	89

LA: Lodo ativado; ORG: Compostos Orgânicos; DQO: Demanda química de oxigênio.



**Figura 4.1: Evolução do valor de DQO no ensaio 2 no reator com lodo ativado**

### 4.1.3. Ensaio 3

Em função das dificuldades encontradas durante os dois primeiros testes, associadas ao manuseio dos compostos orgânicos puros, a fonte de contaminantes foi modificada para um efluente coletado de uma planta industrial automotiva, localizada no estado alemão da Baixa Saxônia. Este efluente foi coletado em um setor de limpeza de peças e possui alta concentração de compostos orgânicos originários de óleos e graxas utilizados para proteger as peças metálicas. Em função dos produtos químicos manuseados na indústria, o efluente gerado possui elevados valores de DQO.

Antes do início do ensaio, tanto o lodo ativado quanto o efluente utilizados foram analisados, de forma a determinar os valores iniciais de DQO. Os resultados são apresentados na Tabela 4.9.

**Tabela 4.9: DQO do lodo ativado e do efluente - Ensaio 3**

Identificação	Data	Hora	DQO (mg/L)
Lodo ativado – filtrado	22.02.2012	16:00	178
Lodo ativado – total	22.02.2012	16:00	5660
Efluente industrial	22.02.2012	14:00	39860

Cada um dos reatores foi preenchido com 500 mililitros do efluente industrial e 2,5 litros de água (reator 1) ou lodo ativado (reator 2).

Na Tabela 4.10 e na Tabela 4.11 são apresentados os resultados obtidos ao longo do ensaio 3.

A Figura 4.2 mostra a evolução dos valores de DQO. Diferentemente dos dois primeiros ensaios, no ensaio 3, em função da adição do efluente industrial, optou-se por analisar amostras filtradas dos dois reatores.

**Tabela 4.10: Ensaio 3 - Reator 1**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
A+EF filtrado 0	23.02.2012	9:05	0,00	4259
A+EF filtrado 1	23.02.2012	9:25	0,33	4144
A+EF filtrado 2	23.02.2012	9:45	0,66	4098
A+EF filtrado 3	23.02.2012	10:05	1,00	4092
A+EF filtrado 4	23.02.2012	10:25	1,33	4268
A+EF filtrado 5	23.02.2012	11:05	2,00	4038
A+EF filtrado 6	23.02.2012	11:45	2,66	4124
A+EF filtrado 7	23.02.2012	12:25	3,33	4120
A+EF filtrado 8	23.02.2012	13:25	4,33	4144
A+EF filtrado 9	23.02.2012	15:25	6,33	4129
A+EF filtrado 10	23.02.2012	17:25	8,33	4134
A+EF filtrado 11	24.02.2012	8:45	23,66	4271
A+EF filtrado 12	24.02.2012	15:00	30,00	3996
A+EF filtrado 13	27.02.2012	9:00	96,00	3262

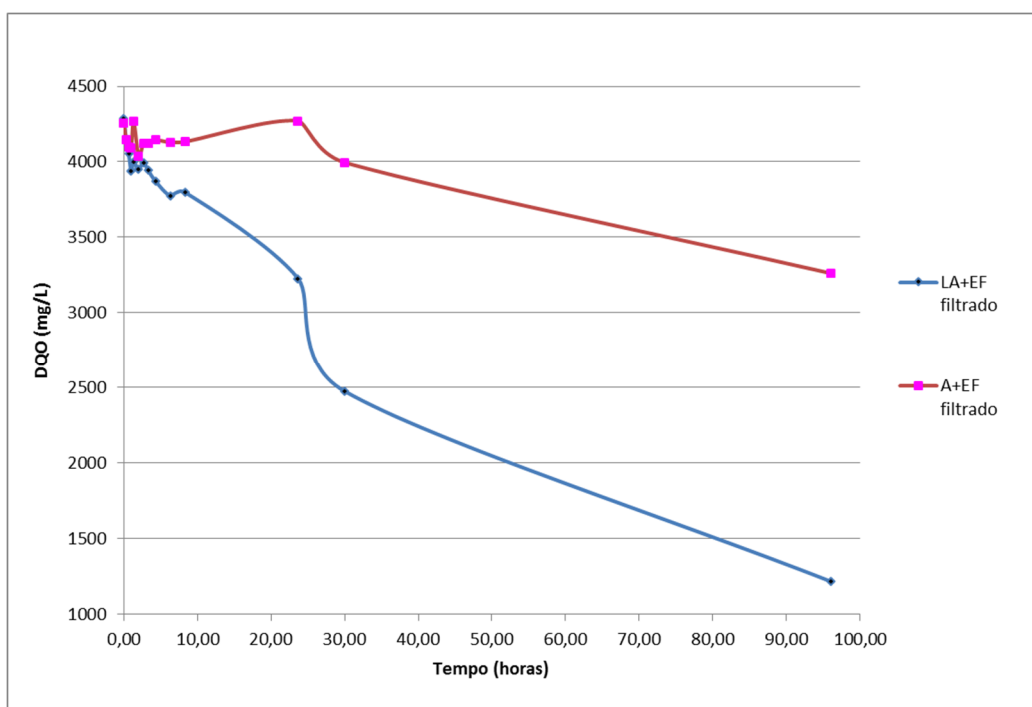
A: Água; EF: Efluente; DQO: Demanda química de oxigênio.

**Tabela 4.11: Ensaio 3 - Reator 2**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
LA+EF filtrado 0	23.02.2012	9:05	0,00	4287
LA+EF filtrado 1	23.02.2012	9:25	0,33	4138
LA+EF filtrado 2	23.02.2012	9:45	0,66	4052
LA+EF filtrado 3	23.02.2012	10:05	1,00	3939
LA+EF filtrado 4	23.02.2012	10:25	1,33	3998
LA+EF filtrado 5	23.02.2012	11:05	2,00	3950
LA+EF filtrado 6	23.02.2012	11:45	2,66	3996
LA+EF filtrado 7	23.02.2012	12:25	3,33	3942
LA+EF filtrado 8	23.02.2012	13:25	4,33	3870
LA+EF filtrado 9	23.02.2012	15:25	6,33	3775
LA+EF filtrado 10	23.02.2012	17:25	8,33	3798
LA+EF filtrado 11	24.02.2012	8:45	23,66	3228
LA+EF filtrado 12	24.02.2012	15:00	30,00	2475
LA+EF filtrado 13	27.02.2012	9:00	96,00	1218

LA: Lodo ativado; EF: Efluente; DQO: Demanda química de oxigênio.





**Figura 4.2: Evolução do valor de DQO nos dois reatores no ensaio 3**

Através dos resultados obtidos foi possível perceber uma elevada redução no valor de DQO do reator 2, quando em comparação com o reator 1. Observa-se também que esta redução é acentuada depois das primeiras 10 horas de ensaio. Tal situação provavelmente é decorrente de uma concentração muito elevada de contaminantes no início do ensaio, o que dificultou o início da biodegradação.

Analisando os resultados ao longo de todo o ensaio, verifica-se a redução na DQO de 23,4% no reator 1 e de 71,6% no reator 2, evidenciando desta forma a atividade microbiana na degradação dos compostos presentes no efluente industrial. A redução no reator 1, onde não foi adicionado o lodo ativado, pode ser explicada pela volatilização ou pela fotodegradação de parte dos compostos presentes no efluente, efeitos esses que também atuam no reator 2. A diferença entre as reduções nos dois reatores, de 48,2%, pode ser traduzida como sendo a fração efetivamente biodegradada.

#### 4.1.4. Ensaio 4

O quarto ensaio foi realizado da mesma forma do terceiro. No entanto, optou-se por utilizar uma concentração menor de contaminantes, visando avaliar

se o mesmo comportamento do terceiro ensaio se repetiria ou se a degradação dos compostos seria iniciada em um período de tempo mais curto.

Assim como em todos os outros ensaios, antes do início, tanto o lodo ativado quanto o efluente utilizados foram analisados, de forma a determinar os valores iniciais de DQO. Os resultados são apresentados na Tabela 4.12.

**Tabela 4.12: DQO do lodo ativado e do efluente - Ensaio 4**

Identificação	Data	Hora	DQO (mg/L)
Lodo ativado – filtrado	28.02.2012	9:30	109
Lodo ativado – total	28.02.2012	9:30	4498
Efluente industrial	28.02.2012	9:30	38730

Cada um dos reatores foi preenchido com 150 mililitros do efluente industrial e 2,85 litros de água (reator 1) ou lodo ativado (reator 2).

Na Tabela 4.13 e na Tabela 4.14 são apresentados os resultados obtidos ao longo do ensaio 4. A Figura 4.3 mostra a evolução dos valores de DQO. Assim como no ensaio 3, optou-se por analisar amostras filtradas dos dois reatores.

**Tabela 4.13: Ensaio 4 - Reator 1**

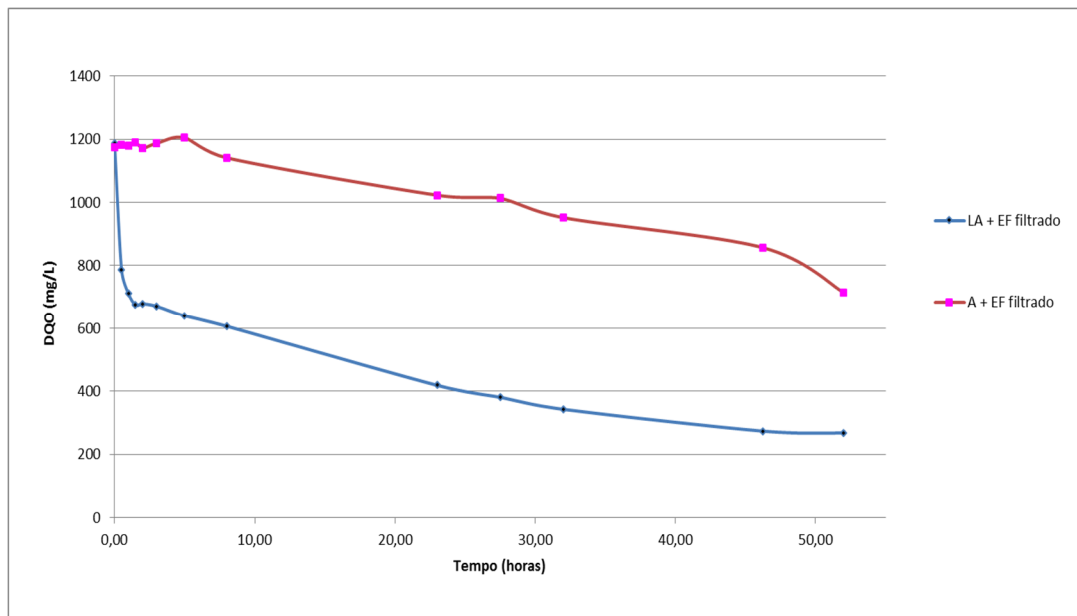
Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
A+EF filtrado 0	28.02.2012	10:00	0,00	1174
A+EF filtrado 1	28.02.2012	10:30	0,50	1183
A+EF filtrado 2	28.02.2012	11:00	1,00	1179
A+EF filtrado 3	28.02.2012	11:30	1,50	1190
A+EF filtrado 4	28.02.2012	12:00	2,00	1172
A+EF filtrado 5	28.02.2012	13:00	3,00	1187
A+EF filtrado 6	28.02.2012	15:00	5,00	1205
A+EF filtrado 7	28.02.2012	18:00	8,00	1141
A+EF filtrado 8	29.02.2012	9:00	23,00	1023
A+EF filtrado 9	29.02.2012	13:30	27,50	1013
A+EF filtrado 10	29.02.2012	18:00	32,00	952
A+EF filtrado 11	01.03.2012	8:00	46,25	857
A+EF filtrado 12	01.03.2012	14:00	52,00	715

A: Água; EF: Efluente; DQO: Demanda química de oxigênio.

**Tabela 4.14: Ensaio 4 - Reator 2**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
LA+EF filtrado 0	28.02.2012	10:00	0,00	1188
LA+EF filtrado 1	28.02.2012	10:30	0,50	787
LA+EF filtrado 2	28.02.2012	11:00	1,00	711
LA+EF filtrado 3	28.02.2012	11:30	1,50	675
LA+EF filtrado 4	28.02.2012	12:00	2,00	679
LA+EF filtrado 5	28.02.2012	13:00	3,00	671
LA+EF filtrado 6	28.02.2012	15:00	5,00	640
LA+EF filtrado 7	28.02.2012	18:00	8,00	606
LA+EF filtrado 8	29.02.2012	9:00	23,00	419
LA+EF filtrado 9	29.02.2012	13:30	27,50	381
LA+EF filtrado 10	29.02.2012	18:00	32,00	343
LA+EF filtrado 11	01.03.2012	8:15	46,25	274
LA+EF filtrado 12	01.03.2012	14:00	52,00	268

LA: Lodo ativado; EF: Efluente; DQO: Demanda química de oxigênio.

**Figura 4.3: Evolução do valor de DQO nos dois reatores no ensaio 4**

Através dos valores de DQO, uma alta degradação inicial pôde ser observada no reator 2, a qual ocorreu durante os primeiros 30 minutos do ensaio. Este comportamento é o inverso do observado no ensaio 3, quando a

concentração inicial de contaminantes foi cerca de 3 vezes superior ao ensaio 4. A redução do valor de DQO no reator com lodo ativado foi de cerca de 77,4%, enquanto a redução no reator contendo apenas água foi de aproximadamente 39,1%. Esta redução de 39% ocorre em função da volatilização de parte dos compostos, Sendo assim, a redução da DQO no reator 2, em função exclusivamente da biodegradação pode ser aproximada como sendo a diferença entre estes dois valores, ou seja, cerca de 38,3%.

Visando avaliar a adsorção dos contaminantes na fração sólida do lodo ativado, foram coletadas também algumas amostras do reator 2, ao longo do ensaio, para serem analisadas sem filtragem. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.15 e na Tabela 4.16.

**Tabela 4.15: Ensaio 4 - Reator 2 - Amostras sem filtragem**

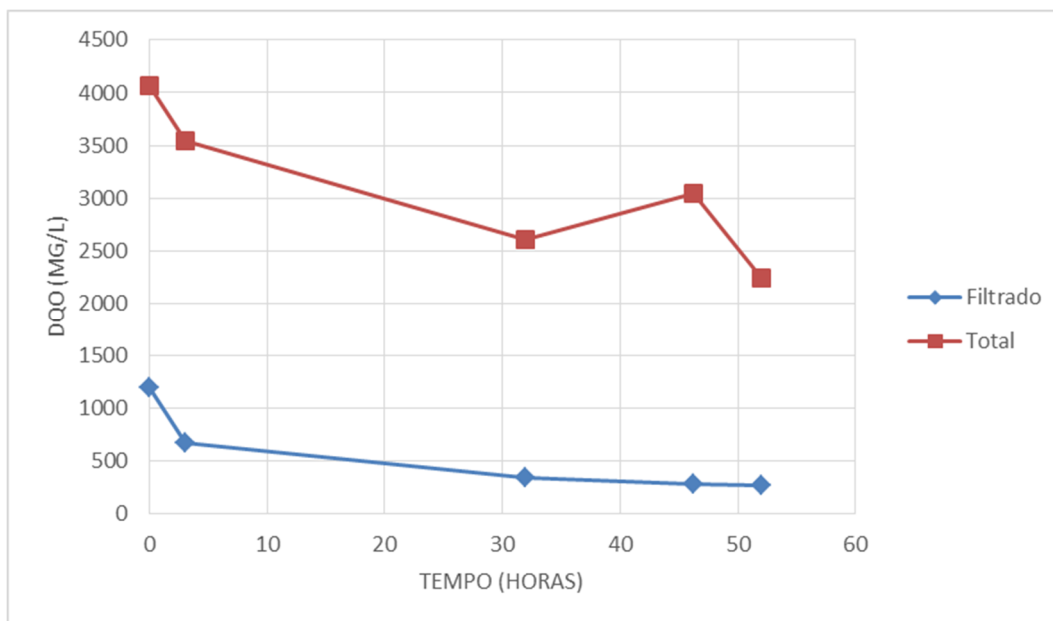
Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
LA+EF total 0	28.02.2012	10:00	0,00	4067
LA+EF total 5	28.02.2012	13:00	3,00	3538
LA+EF total 10	29.02.2012	18:00	32	2606
LA+EF total 11	01.03.2012	8:15	46,25	3045
LA+EF total 12	01.03.2012	14:00	52	2236

LA: Lodo ativado; EF: Efluente; DQO: Demanda química de oxigênio.

**Tabela 4.16: Ensaio 4 - Reator 2 - Amostras com filtragem**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
LA+EF filtrado 0	28.02.2012	10:00	0,00	1188
LA+EF filtrado 5	28.02.2012	13:00	3,00	671
LA+EF filtrado 10	29.02.2012	18:00	32,00	343
LA+EF filtrado 11	01.03.2012	8:15	46,25	274
LA+EF filtrado 12	01.03.2012	14:00	52,00	268

LA: Lodo ativado; EF: Efluente; DQO: Demanda química de oxigênio.



**Figura 4.4: Resultados de DQO nas amostras tratadas, com e sem filtragem, no ensaio 4 – Reator 2**

Os resultados obtidos confirmam a degradação dos compostos presentes no efluente industrial adicionado ao lodo ativado. Percebe-se a redução também na DQO das amostras não filtradas, em valores inclusive superiores à redução observada na amostra filtrada. O resultado verificado na amostra número 11, coletada no teste 4, para análise sem filtragem, mostrou-se fora dos padrões observados, indicando um possível erro na medição. Este erro pode ser consequente de uma homogeneização incompleta da amostra analisada

## 4.2. Ozonização

Os ensaios de ozonização foram realizados em reatores preenchidos com o efluente industrial puro ou diluído e de um ensaio para o outro foi modificado o tempo total de ozonização do reator.

Em relação às condições de pH do meio, não foram realizadas medições. Em estudos realizados por Sevimli e Kinaci (2002), apesar de ter sido verificado que a remoção de DQO foi maior em condições alcalinas, a diferença para um meio ácido não foi significativa. A remoção da DQO aumentou de 11 para 12%, para meio ácido e alcalino, respectivamente.

### 4.2.1. Ensaio 5

O primeiro ensaio de ozonização aconteceu no dia 15/03/2012. Neste ensaio, um reator de vidro foi preenchido com 2 (dois) litros do efluente coletado na indústria automotiva. O efluente industrial foi analisado antes do início do ensaio de forma a determinar o valor de DQO inicial. O resultado é apresentado na Tabela 4.17.

**Tabela 4.17: DQO do efluente - Ensaio 5**

Identificação	Data	Hora	DQO (mg/L)
Efluente industrial	15.03.2012	9:00	34965

A vazão de injeção do equipamento gerador de ozônio foi fixada em 50 L/min e a concentração de ozônio de entrada foi fixada em 80 g/m<sup>3</sup>, gerando uma vazão mássica de ozônio constante de 4 g/min.

Ao longo do ensaio, foram coletadas diversas amostras do efluente, de forma a acompanhar a evolução do valor de DQO, conforme apresentado na Tabela 4.18.

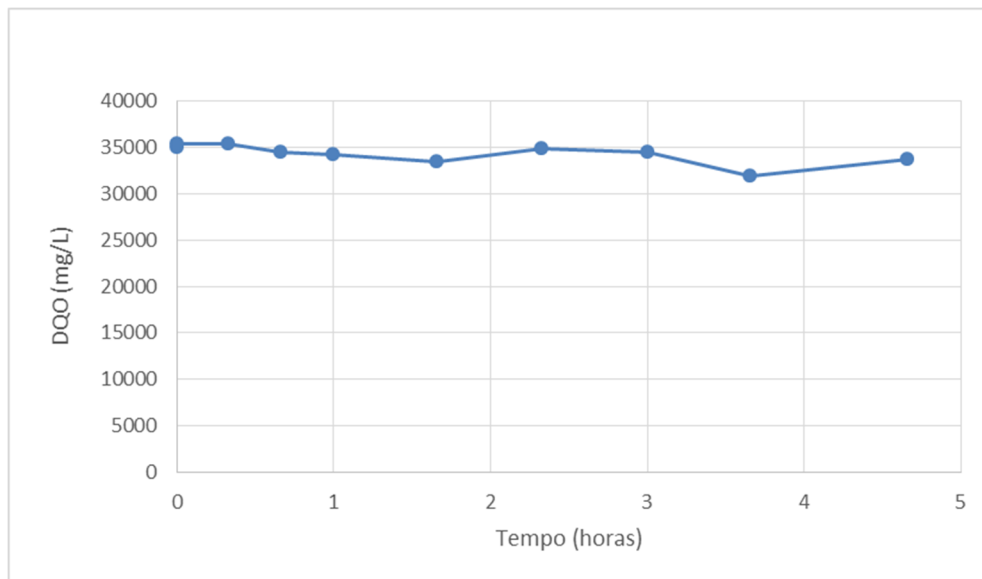
**Tabela 4.18: Ensaio 5 - Ozonização**

Identificação	Data	Hora	Tempo	Concentração de Ozônio na saída (g/m <sup>3</sup> )	DQO (mg/L)
EF t=0	15.03.2012	11:00	0	3,5	35360
EF t=1	15.03.2012	11:20	0,33	6,5	35325
EF t=2	15.03.2012	11:40	0,66	11,0	34480
EF t=3	15.03.2012	12:00	1	17,1	34200
EF t=4	15.03.2012	12:40	1,66	31,9	33475
EF t=5	15.03.2012	13:20	2,33	43,7	34910
EF t=6	15.03.2012	14:00	3	50,6	34520
EF t=7	15.03.2012	14:40	3,66	56,5	31855
EF t=8	15.03.2012	15:40	4,66	61,4	33665

EF: Efluente; DQO: Demanda química de oxigênio.

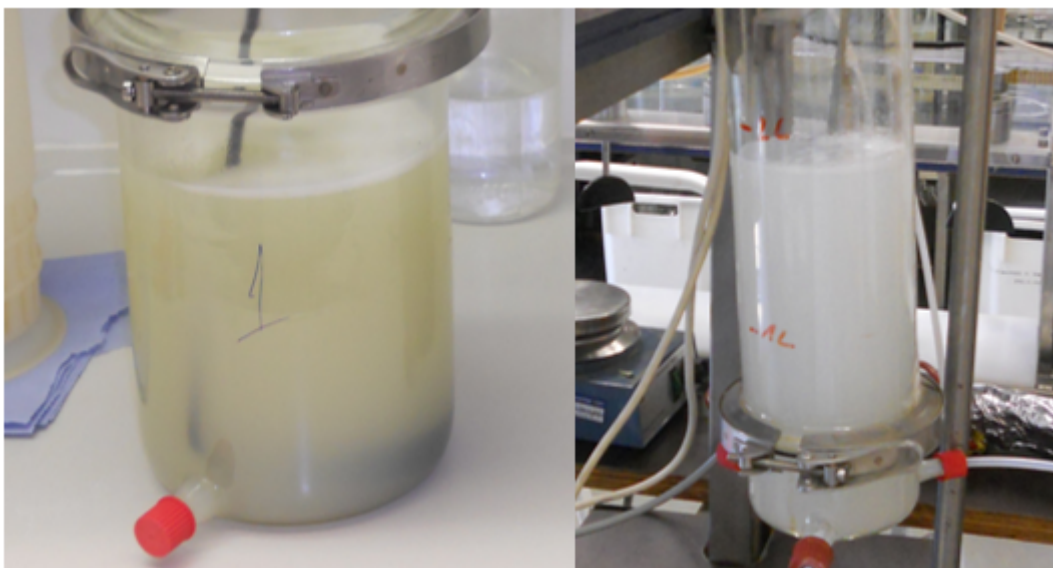
Os resultados das análises não indicaram redução dos valores de DQO, que se mantiveram constantes ao longo de todo o ensaio, conforme é possível observar na Figura 4.5. Mesmo assim verifica-se que o ozônio é consumido no

reator e este consumo é reduzido à medida que o ensaio avança, visto que a concentração de ozônio na saída do reator sofre um incremento.



**Figura 4.5: Evolução da DQO no ensaio 5**

Durante o ensaio foi possível verificar uma mudança na coloração do efluente, que passou de um aspecto esverdeado para uma coloração branca, conforme pode ser visualizado na Figura 4.6. Em compensação, a redução da DQO obtida não foi significativa. Comparando o valor inicial com o valor final observa-se uma redução da ordem de 3,7%.



**Figura 4.6: Mudança de coloração do efluente após a ozonização**

A remoção de cor do efluente, através do processo de ozonização, é relatada por Almeida *et al.* (2004) que, em ensaios realizados com efluentes têxteis, identificou redução da cor de 75%, enquanto a remoção de DQO foi de apenas 12%. Sevimli e Kinaci (2002) obtiveram resultados similares em testes também realizados em efluentes têxteis. Apesar da alta eficiência na remoção de cor, entre 60% e 91%, a remoção de DQO variou entre 9% e 17%, após 30 minutos de ozonização no efluente.

#### 4.2.2. Ensaio 6

No segundo ensaio de ozonização, o reator foi preenchido com apenas 10% do efluente industrial e avolumado para 2 litros com água destilada.

Assim como no ensaio 5, a vazão de injeção do equipamento gerador de ozônio foi fixada em 50 L/min e a concentração de ozônio de entrada foi fixada em 80 g/m<sup>3</sup>, gerando uma vazão mássica de ozônio constante de 4 g/min.

O efluente industrial foi analisado antes do início do ensaio de forma a determinar o valor de DQO inicial. O resultado é apresentado na Tabela 4.19.

**Tabela 4.19: DQO do efluente - Ensaio 6**

Identificação	Data	Hora	DQO (mg/L)
Efluente industrial	19.03.2012	9:00	31205

A Tabela 4.20 apresenta os resultados obtidos ao longo do segundo ensaio de ozonização.

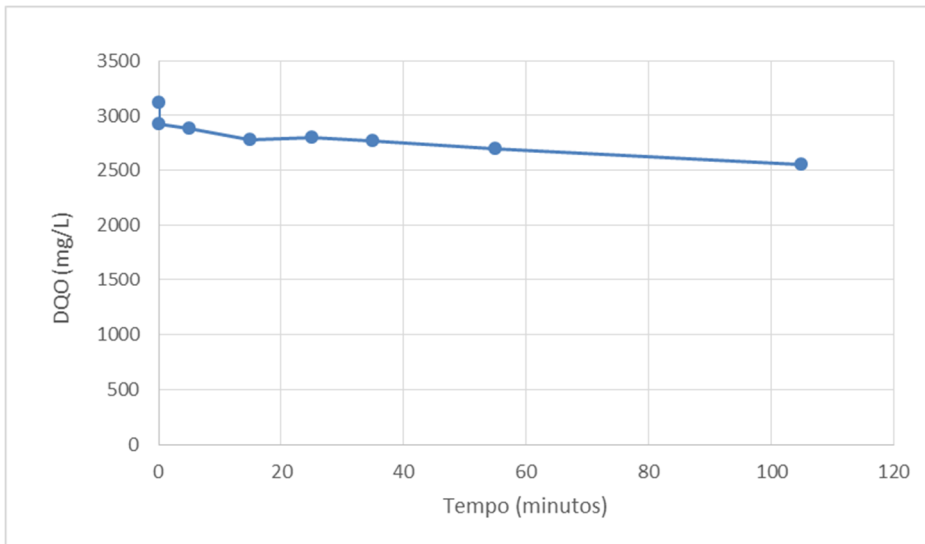
**Tabela 4.20: Ensaio 6 - Ozonização**

Identificação	Data	Hora	Tempo (minutos)	Concentração de ozônio na saída (g/m <sup>3</sup> )	DQO (mg/L)
EF t=0	19.03.2012	9:20	0	3,6	2925
EF t=1	19.03.2012	9:25	5	33,2	2881
EF t=2	19.03.2012	9:35	15	42,7	2785
EF t=3	19.03.2012	9:45	25	58,4	2804
EF t=4	19.03.2012	9:55	35	66,7	2767
EF t=5	19.03.2012	10:15	55	70,0	2695
EF t=6	19.03.2012	11:15	105	73,6	2551

EF: Efluente; DQO: Demanda química de oxigênio.

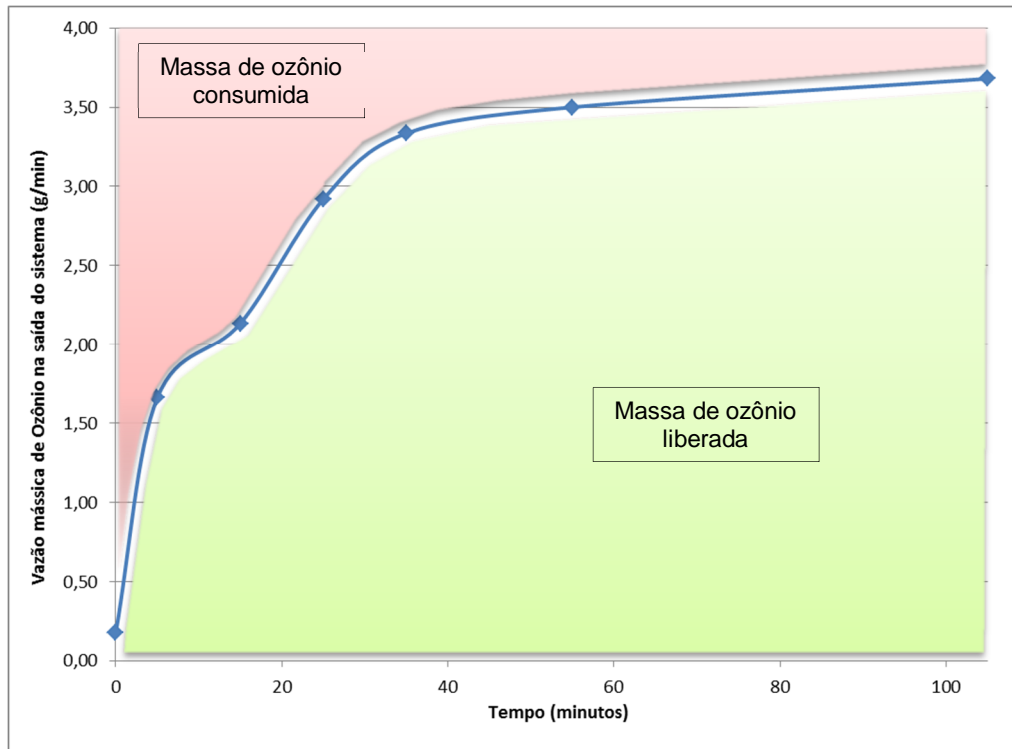


Conforme é possível observar na Figura 4.7, o valor de DQO no reator apresentou uma leve redução, de cerca de 18,3%, quando comparado com o valor inicial de DQO, que neste caso foi adotado como sendo um décimo da DQO medida no efluente antes de ser iniciado o ensaio, já que o reator foi preenchido com apenas 10% do efluente. Novamente, foi observada mudança na coloração do efluente, que passou de esverdeado para branco opaco.



**Figura 4.7: Evolução da DQO no ensaio 6**

A partir das concentrações de ozônio medidas na saída do reator, foi possível realizar o cálculo da massa de ozônio consumida ao longo de todo o ensaio, que pode ser aproximada como sendo a área acima do gráfico da Vazão mássica de ozônio na saída pelo tempo, conforme apresentado na Figura 4.8. Em 105 minutos de ensaio, a massa de ozônio consumida foi de aproximadamente 56 gramas.



**Figura 4.8: Massa de ozônio consumida**

### 4.3. Ozonização e Biodegradação

#### 4.3.1. Ensaio 7

Por fim, foi realizado um ensaio combinando as duas técnicas de tratamento. Em uma primeira etapa, o efluente passou pelo processo de ozonização e posteriormente foi iniciado o processo de biodegradação, através da adição do lodo ativado. O intuito do ensaio foi verificar se o processo de ozonização é capaz de transformar os compostos existentes no efluente a ponto de deixá-los biodegradáveis, facilitando assim o tratamento com o lodo ativado.

O processo de ozonização foi realizado com 2 (dois) litros do efluente puro, da mesma forma como foi realizado no primeiro ensaio de ozonização. A vazão de injeção do equipamento gerador de ozônio foi fixada em 50 L/min e a concentração de ozônio de entrada foi fixada em 80 g/m<sup>3</sup>, gerando uma vazão mássica de ozônio constante de 4 g/min.

Antes do início do ensaio, o efluente industrial foi analisado, de forma a determinar o valor de DQO inicial. O resultado é apresentado na Tabela 4.21.

**Tabela 4.21: DQO do efluente - Ensaio 7**

Identificação	Data	Hora	DQO (mg/L)
Efluente industrial	17.04.2012	11:00	32390

DQO: Demanda química de oxigênio.

O ensaio foi iniciado às 11:00 do dia 17/04/2012 e o sistema gerador de ozônio permaneceu ligado por 6 horas e 10 minutos, de forma ininterrupta. A Tabela 4.22 apresenta a evolução da DQO ao longo do processo de ozonização.

**Tabela 4.22: Ozonização - Ensaio 7**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	Concentração de ozônio na saída (g/m <sup>3</sup> )	DQO (mg/L)
Ozonização t=1	17.04.2012	11:10	0,17	0,00	32345
Ozonização t=2	17.04.2012	13:10	2,17	30,20	30735
Ozonização t=3	17.04.2012	15:10	4,17	49,70	29975
Ozonização t=4	17.04.2012	17:10	6,17	57,50	29255

DQO: Demanda química de oxigênio.

Após o fim do processo de ozonização, o efluente foi armazenado e no dia 18/04/2012, foi preparado o ensaio de biodegradação, com o uso de lodo ativado. Cada um dos reatores foi preenchido com 300 mililitros do efluente industrial e 2,7 litros de água (reator 1) ou lodo ativado (reator 2).

Assim como em todos os outros ensaios, antes do início, o lodo ativado foi analisado, de forma a determinar o valor inicial de DQO. Os resultados são apresentados na Tabela 4.23.

**Tabela 4.23: DQO do lodo ativado – Ensaio 7**

Identificação	Data	Hora	DQO (mg/L)
Lodo ativado – total	17.04.2012	16:30	6699

Na Tabela 4.24 e na Tabela 4.25 são apresentados os resultados obtidos ao longo do ensaio de biodegradação. O gráfico mostrando a evolução dos valores de DQO é apresentado na Figura 4.9. Para a confecção do gráfico, os valores de DQO obtidos no ensaio de biodegradação foram multiplicados por 10, visto que neste ensaio foi utilizado apenas 10% de efluente.

Todas as amostras coletadas nos reatores 1 e 2 foram filtradas antes de serem realizadas as análises de DQO.

**Tabela 4.24: Biodegradação - Ensaio 7 - Reator 1**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
A+EF filtrado 0	18.04.2012	10:15	0,00	2163
A+EF filtrado 1	18.04.2012	10:45	0,50	2097
A+EF filtrado 2	18.04.2012	11:15	1,00	2134
A+EF filtrado 3	18.04.2012	11:45	1,50	2154
A+EF filtrado 4	18.04.2012	12:45	2,00	2173
A+EF filtrado 5	18.04.2012	13:45	3,00	2132
A+EF filtrado 6	18.04.2012	15:45	5,00	2097
A+EF filtrado 7	18.04.2012	17:45	7,00	2169
A+EF filtrado 8	19.04.2012	9:30	23,25	2117
A+EF filtrado 9	20.04.2012	9:30	47,25	2120

A: Água; EF: Efluente; DQO: Demanda química de oxigênio.

**Tabela 4.25: Biodegradação - Ensaio 7 - Reator 2**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
LA+EF filtrado 0	18.04.2012	10:15	0,00	1689
LA+EF filtrado 1	18.04.2012	10:45	0,50	1455
LA+EF filtrado 2	18.04.2012	11:15	1,00	1357
LA+EF filtrado 3	18.04.2012	11:45	1,50	1297
LA+EF filtrado 4	18.04.2012	12:45	2,00	1232
LA+EF filtrado 5	18.04.2012	13:45	3,00	1203
LA+EF filtrado 6	18.04.2012	15:45	5,00	1109
LA+EF filtrado 7	18.04.2012	17:45	7,00	1079
LA+EF filtrado 8	19.04.2012	9:30	23,25	957
LA+EF filtrado 9	20.04.2012	9:30	47,25	839

LA: Lodo ativado; EF: Efluente; DQO: Demanda química de oxigênio.

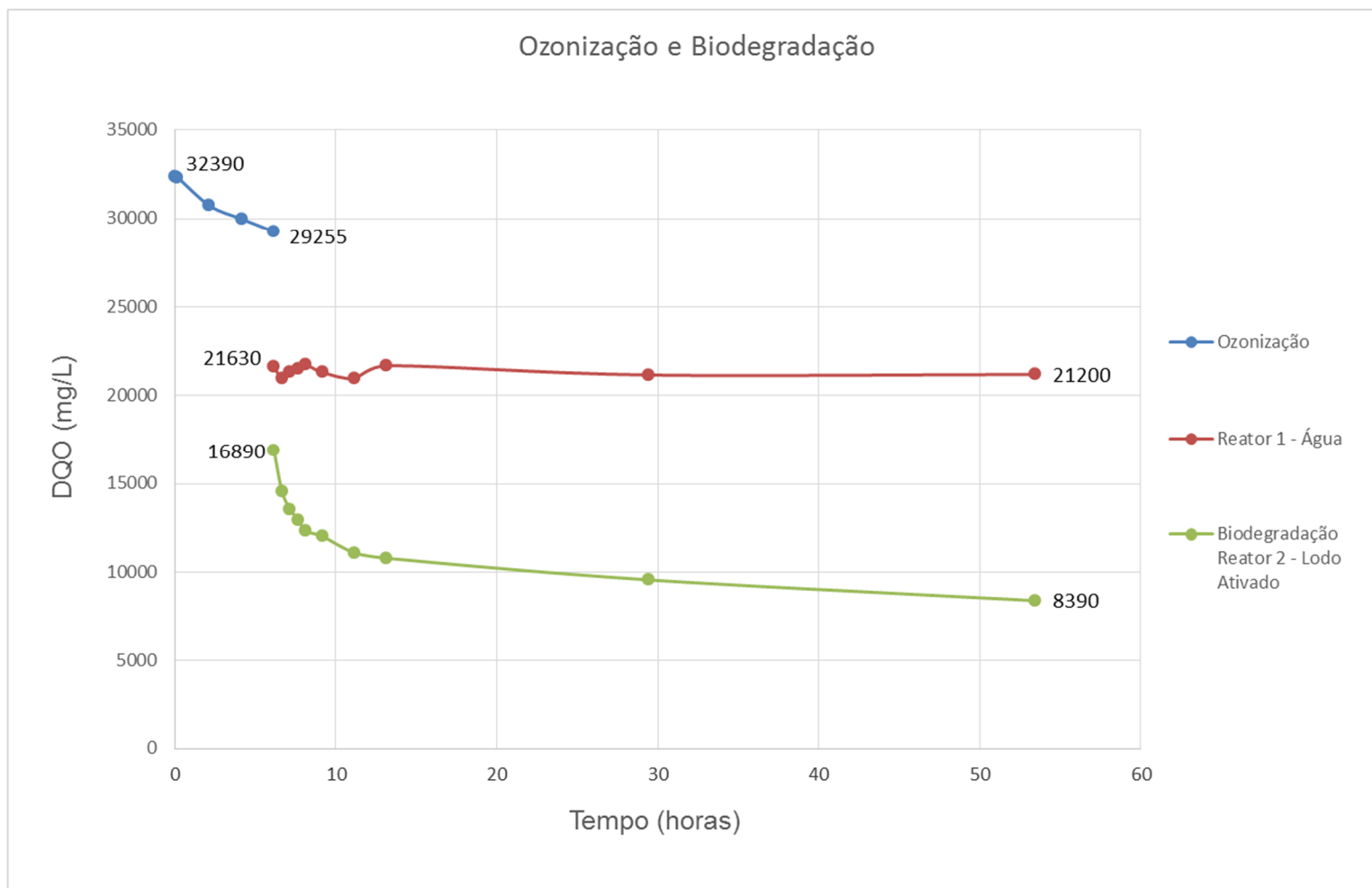


Figura 4.9: Evolução da DQO - Ozonização e Biodegradação

Através do gráfico, nota-se diferença entre o valor de DQO no final do processo de ozonização e no início da biodegradação. Esta diferença ocorreu em função das amostras coletadas no processo de biodegradação terem sido filtradas antes da análise e por isso, a parte sólida foi desconsiderada. Já a diferença entre os valores iniciais dos reatores 1 e 2 é consequência da adsorção de parte dos compostos na fração sólida do lodo ativado.

Para comprovar que os compostos foram degradados no reator 2, preenchido com lodo ativado, foram coletadas duas amostras para análises sem filtragem, uma no início e outra ao término do ensaio. Os resultados, apresentados na Tabela 4.26 e na Tabela 4.27, evidenciam a degradação, visto que o valor total no reator 2 também foi reduzido ao longo do ensaio, enquanto o valor no reator 1 se manteve praticamente o mesmo.

**Tabela 4.26: Biodegradação - Ensaio 7 - Reator 1 – Amostras sem filtragem**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
A+EF A total 0	18/04/2012	10:15	0,00	2780
A+EF A total 9	20/04/2012	9:30	47,25	2701

**Tabela 4.27: Biodegradação - Ensaio 7 - Reator 2 – Amostras sem filtragem**

Identificação	Data	Hora	Tempo (horas)	DQO (mg/L)
LA+EF A total 0	18/04/2012	10:15	0,00	6688
LA+EF A total 9	20/04/2012	9:30	47,25	4861

Através dos resultados apresentados na Figura 4.9, considerando apenas a fase de ozonização nota-se uma redução no valor de DQO de cerca de 10%. Além da degradação de alguns compostos, essa redução pode também ser atribuída à volatilização de parte deles. Ao contrário dos ensaios 3 e 4, quando o reator 1 apresentou significativa redução, associada à volatilização, neste ensaio os valores inicial e final no reator 1 foram praticamente os mesmos, indicando que a fração de compostos mais voláteis já havia sido removida durante o processo de ozonização.

Considerando os resultados do processo combinado, a redução da DQO atinge cerca de 74,1%, quando levados em conta os valores obtidos no reator 2. Neste caso, ao contrário dos ensaios 3 e 4, a redução verificada no reator 2 pode ser atribuída exclusivamente à biodegradação dos compostos, uma vez que a fração mais volátil já havia sido removida na fase de ozonização.