



## Utilização dos processos oxidativos avançados Fenton e percarbonato de sódio para tratamento de solo contaminado com óleo diesel

Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti<sup>1</sup>, Mirella de Andrade Loureiro<sup>2</sup>,  
Alyna Maria de Oliveira Silva<sup>3</sup>, Maurício Alves da Motta Sobrinho<sup>4</sup>,  
Clístenes Willians Araújo do Nascimento<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Química/ Unidade Acadêmica de Serra Talhada/ Universidade Federal Rural de Pernambuco (jorge@uast.ufrpe.br)

<sup>2</sup>Grupo de Processos em Tecnologias Ambientais / Departamento de Engenharia Química/ Universidade Federal de Pernambuco (mirella\_loureiro@hotmail.com)

<sup>3</sup>Grupo de Processos em Tecnologias Ambientais / Departamento de Engenharia Química/ Universidade Federal de Pernambuco (alyninha\_mos@hotmail.com)

<sup>4</sup>Grupo de Processos em Tecnologias Ambientais / Departamento de Engenharia Química/ Universidade Federal de Pernambuco (mottas@ufpe.br)

<sup>5</sup>Laboratório de Fertilidade do Solo / Departamento de Agronomia/ Universidade Federal de Rural de Pernambuco (clistenes@depa.ufrpe.br)

### Resumo

Este trabalho consistiu na utilização dos Processos Oxidativos Avançados (POA), Fenton e percarbonato de sódio, para degradação da matéria orgânica contida num solo contaminado pelo óleo diesel. O solo foi retirado do local onde está sendo construída a Refinaria de Petróleo Abreu e Lima, Ipojuca-PE, e o óleo diesel foi gentilmente cedido pela Agência Nacional de Petróleo (ANP). Os oxidantes foram administrados em diferentes sistemas, contendo como principais variáveis quatro diferentes fontes de radiação UV, concentrações dos oxidantes e a utilização de  $Fe^{+2}$ , como catalisador, comparando-o com o ferro endógeno. Como resposta ao tratamento, determinou-se o carbono orgânico total (COT) do solo, como uma medida prévia da eficiência do tratamento oxidativo. Os resultados indicaram uma degradação superior a 90% em alguns experimentos, vislumbrando uma utilização futura destes POA em grandes áreas contaminadas por derivados de petróleo.

Palavras-chave: Processos oxidativos avançados. Tratamento de solo. Reagente Fenton.  
Área Temática: Tecnologias Ambientais.

### Abstract

*This work consisted in use of Advanced Oxidative Processes (AOP), Fenton and sodium percarbonate, for the degradation of the soil organic compound artificially contaminated with diesel. The soil was removed of the place where it will be installed the Oil Refinery Abreu e Lima, Ipojuca-PE, and the diesel was gently yielded by the National Oil Agency. The oxidants were managed in different systems, totalizing 32 experiments, having as main variables four different sources of UV radiation, oxidants concentrations and  $Fe^{+2}$  as a catalyst, comparing it with the endogenous iron. As a treatment answer, the soil total organic carbon (TOC) was determined as a previous measure of the oxidative treatment efficiency. The results indicated a degradation of more than 90% (TOC) in some experiments, glimpsing a future use of these AOP in great contaminated areas with petroleum derivatives.*

Key words: Advanced Oxidative Processes. Soil treatment. Fenton's reaction.  
Theme Area: Environment technology.



### 1 Introdução

A remediação de sítios e solos poluídos é uma problemática muito importante no que se refere à proteção do meio ambiente. De fato, as atividades industriais presentes e passadas provocaram a aparição de milhares de hectares de áreas poluídas em todo planeta. Sabe-se que os solos desempenham um papel fundamental na transferência dos poluentes. Eles controlam o transporte destes na direção do subsolo e das águas subterrâneas, assim como a transferência para a superfície e em particular na direção dos animais e vegetais, que irão incidir diretamente sobre a saúde humana.

A implantação da Refinaria de Petróleo Abreu e Lima, no município de Ipojuca, Estado de Pernambuco, traz consigo a possibilidade de ocorrerem problemas sérios de contaminação de solos e águas. Evidentemente não é o desejado, porém, exemplos ocorridos no mundo todo fazem crer que isto poderá infelizmente acontecer. As indústrias de petróleo lidam com problemas de difícil solução concernentes as atividades voltadas para a proteção ambiental em todo mundo, principalmente, as que estão ligadas à água superficial, subterrânea, ar e solo. Isso acontece em virtude de vazamentos, derrames e acidentes durante a exploração, refinamento, transporte e armazenamento do petróleo e seus derivados, como gás natural, gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, parafinas, asfalto, alcatrão de hulha, gasolina, querosene, óleo diesel, óleo combustível e óleo lubrificante, entre outros.

Como uma nova alternativa, vem se estudando Processos Oxidativos Avançados (POA), com o objetivo de degradar hidrocarbonetos de petróleo presentes no solo. Esses processos vêm se destacando como uma tecnologia para tratamento de contaminantes orgânicos. A grande vantagem do mesmo é o fato de ser um tipo de tratamento destrutivo, onde o contaminante é degradado através de reações químicas de oxidação-redução (TIBURTIUS, 2004).

Neste trabalho, uma amostra de solo retirado de uma região costeira foi levado ao Laboratório de Processos Químicos, alocado ao Grupo de Processos em Tecnologias Ambientais (GPTA), sendo posteriormente contaminado com óleo diesel. Em seguida, realizou-se uma série de experimentos envolvendo dois diferentes oxidantes, o reagente Fenton ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}$ ) e o percarbonato de sódio ( $2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$ ), com escopo de degradar o máximo possível da matéria orgânica poluente advinda do combustível derivado do petróleo. Os experimentos foram realizados em escala de bancada com quatro diferentes fontes de radiação UV, sendo as mesmas, luz solar, luz branca fluorescente, luz negra (*black light*), e ausência de luz; concentrações diferentes dos oxidantes; e por fim, uso de cátions ferrosos originados de uma solução de sulfato ferroso, ou uso de ferro endógeno natural do solo. Totalizando 32 experimentos.

Como principais objetivos deste trabalho, destacam-se a degradação da matéria orgânica e o estudo da influência dos fatores citados anteriormente, como as diferentes fontes de radiação UV, concentrações dos oxidantes e o uso dos cátions ferrosos, no resultado final da degradação dos orgânicos poluentes.

### 2 Revisão Teórica

O solo é definido como sendo um material mineral e orgânico não consolidado na superfície imediata da terra que serve como meio natural para o crescimento das plantas terrestres. O solo representa não somente um agregado de água, ar, matérias orgânicas e minerais, mas um conjunto de fenômenos naturais organizados que proporcionam um equilíbrio dinâmico (CALVET, 2003). É geralmente identificado como a camada superficial da crosta terrestre, a interface entre a atmosfera, hidrosfera e geosfera. É um recurso vital, dinâmico, com propriedades físicas, químicas e biológicas distintas, constituídos por partículas minerais de pequenos tamanhos, matéria orgânica, água, ar e organismos vivos. É



um sistema particulado, composto em parte por rocha exposta a erosão e outros minerais, e ainda por matéria orgânica parcialmente degradada, que cobre grande parte da superfície terrestre (BOTKIN, 2005).

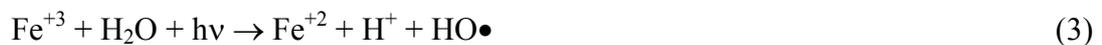
O uso crescente de derivados de petróleo em processos industriais proporciona a geração de uma diversidade de produtos cada vez mais utilizados pela sociedade atual. Uma das conseqüências negativas do uso e manipulação de hidrocarbonetos é a geração de resíduos e efluentes altamente poluidores. Estes derivados de petróleo também são denominados compostos de fase líquida não aquosa, NAPL, cujas diferenças nas propriedades físicas e químicas são determinantes na imiscibilidade em água e no transporte em solos (MOREIRA, 2005).

A oxidação química é uma técnica de recuperação que se baseia na utilização de um agente oxidante responsável pela mineralização de orgânicos poluentes presentes em solos contaminados ou águas subterrâneas contaminadas, em tratamentos *ex-situ* (fora do local de contaminação) ou *in-situ* (no local contaminado). Os principais oxidantes utilizados são peróxido de hidrogênio, reagente Fenton, permanganatos e persulfatos (ITRC, 2005) e (USEPA, 2004). O Reagente Fenton é composto de uma solução de peróxido de hidrogênio e um sal de ferro ( $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$ ) em meio ácido, produzindo radicais hidroxila com grande poder oxidante na degradação de contaminantes tóxicos. Reações de Fenton têm sido largamente utilizadas na destruição de contaminantes orgânicos incluindo compostos aromáticos, uma variedade grande de herbicidas e pesticidas, efluentes têxteis, entre outros, situados em meio aquoso ou dispersos no solo.

O mecanismo para o Reagente de Fenton está detalhado nas equações 1 e 2, respectivamente.



A hidroxila é gerada por uma cadeia de mecanismos, e reage de maneira rápida e não seletiva com a maioria dos compostos orgânicos pela abstração de hidrogênio ou adição a ligação insaturada  $\text{C} = \text{C}$  (FARES, 2003). O processo que utiliza os Reagentes de Fenton combinados com radiação UV de fonte artificial como as lâmpadas brancas, ou fonte natural como a luz solar, é chamado de Reativo Foto-Fenton. Esse processo é capaz de aumentar a eficiência na degradação dos compostos orgânicos devido à contínua regeneração do ferro (II) via foto-redução do ferro (III), conforme demonstra a Equação 3. Os comprimentos de onda mais importantes nas reações Foto-Fenton ficam entre 300 e 400 nm, sendo as emissões solares iniciadas em 300 nm (CHEN, 2001).



O pH do sistema, para a reação de Fenton, segundo Lu (2000), atinge valores ótimo para as reações ferro-catalíticas em torno de 3,0. O aumento do mesmo pode diminuir a eficiência deste reativo devido ao aumento da precipitação do ferro (catalisador) sob a forma de peróxidos.

Já o percarbonato de sódio,  $2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}_2$ , é um sólido branco, cristalino, solúvel em água. É um agente oxidante bastante utilizado em Indústrias de Sabões em Pó para clareamento de roupas, podendo ser utilizado também em tratamentos dentários e clarificação de papéis. Quando solubilizado o mesmo libera peróxido de hidrogênio, que atuará como agente oxidante. Uma das vantagens do uso do percarbonato é que o mesmo atua de forma eficiente em pH alcalino, sua condição natural, não havendo a necessidade da correção do mesmo, como no reagente Fenton.



### 3 Metodologia

#### 3.1 Caracterização do solo

A caracterização do solo foi realizada de acordo com a metodologia do EMBRAPA, 1997, com o objetivo de auxiliar o desenvolvimento do tratamento. Foram levantadas as características físico-químicas do solo, tais como: pH, condutividade elétrica ( $\text{dS.m}^{-1}$ ), carbono orgânico ( $\text{g.kg}^{-1}$ ), matéria orgânica ( $\text{g.kg}^{-1}$ ), nitrogênio ( $\text{g.kg}^{-1}$ ), relação carbono nitrogênio, fósforo assimilável ( $\text{g.kg}^{-1}$ ), complexo sortivo formado pelos cátions ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{H}^{+}$  ( $\text{cmol.kg}^{-1}$ ) e ferro total ( $\text{g.kg}^{-1}$ ).

#### 3.2 Contaminação do solo

Para o preparo e contaminação do solo com óleo diesel, colocou-se uma alíquota de 1 kg do solo, peneirado em 100 mesh, num recipiente de vidro. Adicionou-se 400 mL do óleo diesel e homogeneizou-se a mistura, com ajuda de espátulas e manuseando-a com luvas adequadas. Armazenou-se a amostra contaminada no interior de uma geladeira, em um recipiente hermeticamente fechado.

#### 3.3 Planejamento experimental para a oxidação avançada

O estudo da oxidação avançada no solo contaminado com óleo diesel em escala de bancada foi realizado segundo um planejamento experimental dotado de 32 experimentos. Para este estudo laboratorial, utilizou-se um sistema reativo construído em madeira, iluminado artificialmente (com lâmpada fluorescente comum ou com luz negra) e circundado com folhas de papel laminado, aproveitando o máximo possível da radiação UV. Além deste sistema, também utilizou-se a luz solar (das 9h às 17h), e um meio com completa ausência de iluminação. Os experimentos foram realizados utilizando-se alíquotas de 5 g de solo contaminado, em béqueres de 600 mL, utilizando 40 mL de solução oxidante (completando o volume do peróxido de hidrogênio ou dissolvendo o percarbonato com água), durante 8 h. Para o reagente Fenton, o pH foi corrigido para valores entre 2,5 e 3,0. Para o percarbonato, o pH utilizado foi o proveniente de sua dissolução em água destilada, adicionado ou não à solução de sulfato ferroso, ficando entre 10,0 e 11,0. O peróxido de hidrogênio utilizado foi oriundo de uma solução comercial, com percentual do oxidante entre 32 e 36% em massa. Já a solução do sulfato ferroso, foi preparada com  $[\text{Fe}^{+2}] = 0,18 \text{ mol.L}^{-1}$ . As tabelas 1, 2, 3 e 4 sumarizam o planejamento utilizado para ambos oxidantes e informam os valores de referência utilizados.

Tabela 1 – Planejamento experimental para oxidação por Fenton nas lâmpadas fluorescente e negra

Fatores	Níveis dos Fatores							
	Lâmpada fluorescente				Luz negra			
Fonte UV								
Volume de $\text{H}_2\text{O}_2$ (mL)	$V_1 = 15$		$V_2 = 30$		$V_1 = 15$		$V_2 = 30$	
Volume da solução de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (mL)	$\text{Fe}_1=0$	$\text{Fe}_2=2$	$\text{Fe}_1=0$	$\text{Fe}_2=2$	$\text{Fe}_1=0$	$\text{Fe}_2=2$	$\text{Fe}_1=0$	$\text{Fe}_2=2$
Nome do experimento	LF	LF	LF	LF	LN	LN	LN	LN
	$V_1$	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_1$	$V_1$	$V_2$	$V_2$
	$\text{Fe}_1$	$\text{Fe}_2$	$\text{Fe}_1$	$\text{Fe}_2$	$\text{Fe}_1$	$\text{Fe}_2$	$\text{Fe}_1$	$\text{Fe}_2$
Número do experimento	1	2	3	4	5	6	7	8



Tabela 2 – Planejamento experimental para oxidação por Fenton na luz solar e na ausência de luz

Fatores	Níveis dos Fatores							
Fonte UV	Luz solar				Sem Luz (Processo Fenton)			
Volume de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL)	V <sub>1</sub> = 15		V <sub>2</sub> = 30		V <sub>1</sub> = 15		V <sub>2</sub> = 30	
Volume da solução de FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O (mL)	Fe <sub>1</sub> =0	Fe <sub>2</sub> =2	Fe <sub>1</sub> =0	Fe <sub>2</sub> =2	Fe <sub>1</sub> =0	Fe <sub>2</sub> =2	Fe <sub>1</sub> =0	Fe <sub>2</sub> =2
Nome do experimento	LS	LS	LS	LS	SL	SL	SL	SL
	V <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>
	Fe <sub>1</sub>	Fe <sub>2</sub>	Fe <sub>1</sub>	Fe <sub>2</sub>	Fe <sub>1</sub>	Fe <sub>2</sub>	Fe <sub>1</sub>	Fe <sub>2</sub>
<b>Número do experimento</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>

Tabela 3 – Planejamento para oxidação por percarbonato nas lâmpadas fluorescente e negra

Fatores	Níveis dos Fatores							
Fonte UV	Lâmpada fluorescente				Luz negra			
Massa de 2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)	M <sub>1</sub> = 0,5		M <sub>2</sub> = 1,0		M <sub>1</sub> = 0,5		M <sub>2</sub> = 1,0	
Volume da solução de FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O (mL)	Fe <sub>1</sub> =0	Fe <sub>2</sub> =2						
Nome do Experimento	LF	LF	LF	LF	LN	LN	LN	LN
	M <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>2</sub>
	Fe <sub>1</sub>	Fe <sub>2</sub>						
<b>Número do experimento</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>

Tabela 4 – Planejamento para oxidação por percarbonato na luz solar e na ausência de luz

Fatores	Níveis dos Fatores							
Fonte UV	Luz solar				Sem Luz			
Massa de 2Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)	M <sub>1</sub> = 0,5		M <sub>2</sub> = 1,0		M <sub>1</sub> = 0,5		M <sub>2</sub> = 1,0	
Volume da solução de FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O (mL)	Fe <sub>1</sub> =0	Fe <sub>2</sub> =2						
Nome do Experimento	LS	LS	LS	LS	SL	SL	SL	SL
	M <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>2</sub>
	Fe <sub>1</sub>	Fe <sub>2</sub>						
<b>Número do experimento</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>32</b>

Após a realização destes experimentos, foi calculado o carbono orgânico total restante no solo, comparando-o ao seu valor inicial.

### 3.4 Determinação do carbono orgânico total

Ao final das 8 h destinadas a aplicação do oxidante, o solo é lavado, filtrado e posto para secar brandamente. Ressalta-se a importância do teste com permanganato de potássio no filtrado para que haja certeza de que todo oxidante foi retirado no ato da lavagem.



A determinação do carbono orgânico total foi realizada utilizando-se o Método Walkey-Black Modificado. Esse método consiste em oxidar o carbono orgânico do solo pelo dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) em meio sulfúrico formando gás carbônico, água, e sulfatos de cromo III e potássio, conforme mostra a Equação 4.



O excesso de dicromato de potássio remanescente da oxidação do carbono orgânico é titulado com sulfato ferroso amoniacal, como mostra a Equação 5. Uma vez determinado este excesso, pode-se calcular a quantidade de carbono orgânico existente na amostra inicial.



Para cada análise, pesa-se 0,5 g de solo seco, adiciona-se 15 mL de uma solução  $0,8 \text{ mol.L}^{-1}$  de dicromato de potássio e põe-se a mistura para aquecimento brando numa manta aquecedora. O sistema deve conter um condensador acoplado, evitando assim lançamento de vapores tóxicos e perda de solvente. Após fervura leve por 5 minutos, a mistura é resfriada lentamente e adicionada a 80 mL de água destilada, 2 mL de ácido fosfórico P.A. e 3 gotas de difenilamina (indicador) 1% em ácido sulfúrico. A mistura final é titulada com uma solução de sulfato ferroso amoniacal  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$  0,1 N. Para determinação do COT, utiliza-se a Equação 6.

$$COT(mg.g^{-1}) = (40 - V_{titulante})0,6f \quad (6)$$

Sendo  $f$  um fator de correção calculado para titulação do branco realizado entre a solução de dicromato de potássio e o sulfato ferroso amoniacal,  $f = 40/V_{titulante}$ .

## 4 Resultados

### 4.1 Caracterização do solo

Os resultados da caracterização do solo estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização do solo *in natura*

Parâmetros	Resultados	Parâmetros	Resultados
pH (água 1:2,5)	4,83	Ferro Total ( $g.kg^{-1}$ )	13,80
P ( $g.kg^{-1}$ )	2,00	Carbono Orgânico ( $g.kg^{-1}$ )	1,53
$Na^+$ ( $cmol. dm^{-3}$ )	0,64	Matéria Orgânica ( $g.kg^{-1}$ )	2,63
$K^+$ ( $cmol. dm^{-3}$ )	0,07	COT solo poluído ( $g.kg^{-1}$ )	41,75
$Ca^{+2}$ e $Mg^{+2}$ ( $cmol. dm^{-3}$ )	0,80	Nitrogênio ( $g.kg^{-1}$ )	0,01
$Ca^{+2}$ ( $cmol. dm^{-3}$ )	0,50	Relação Carbono / Nitrogênio	153,00
$Al^{+3}$ ( $cmol. dm^{-3}$ )	2,87	Areia (%)	55,12
H e $Al^{+3}$ ( $cmol. DM^{-3}$ )	6,31	Silte (%)	8,00
Condutividade Elétrica ( $\mu S.cm^{-1}$ )	52,00	Argila (%)	36,88

Os resultados indicaram um solo ácido e levemente arenoso, mas com concentração expressiva de argila. A presença de argila na mistura constituinte do solo pode representar uma dificuldade na dessorção do material poluente, necessitando muitas vezes de uma quantidade extra de oxidante. Eles indicaram também um valor pouco representativo para o COT no solo natural. Entretanto houve um ganho expressivo na quantidade de carbono orgânico após a contaminação do mesmo por óleo diesel, o que, obviamente, já era esperado. Para o ferro foi quantificado uma porcentagem em massa de 1,53%, o que sugere que o mesmo pode catalisar a reação de Fenton. Ou seja, sem uso de uma fonte externa deste metal. Porém, é necessária a validação experimental desta condição.



## 4.2 Degradação do carbono orgânico total

Após aplicação dos dois oxidantes, nas condições citadas nas Tabelas 1, 2, 3 e 4, houve uma redução significativa no teor de carbono orgânico total. Os resultados estão expressos nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – resultados do COT para o reagente Fenton (foto-Fenton)

Experimento	Número de Referência	COT final	Redução do COT (%)	Experimento	Número de Referência	COT final	Redução do COT (%)
LF, V <sub>1</sub> , Fe <sub>1</sub>	1	8,671	79,233	LS, V <sub>1</sub> , Fe <sub>1</sub>	9	4,635	88,898
LF, V <sub>1</sub> , Fe <sub>2</sub>	2	6,136	85,303	LS, V <sub>1</sub> , Fe <sub>2</sub>	10	3,168	92,412
LF, V <sub>2</sub> , Fe <sub>1</sub>	3	7,870	81,150	LS, V <sub>2</sub> , Fe <sub>1</sub>	11	3,935	90,575
LF, V <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub>	4	5,869	<b>85,942</b>	LS, V <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub>	12	2,968	<b>92,891</b>
LN, V <sub>1</sub> , Fe <sub>1</sub>	5	4,569	89,057	SL, V <sub>1</sub> , Fe <sub>1</sub>	13	8,804	78,914
LN, V <sub>1</sub> , Fe <sub>2</sub>	6	3,101	92,572	SL, V <sub>1</sub> , Fe <sub>2</sub>	14	6,270	84,984
LN, V <sub>2</sub> , Fe <sub>1</sub>	7	3,868	90,735	SL, V <sub>2</sub> , Fe <sub>1</sub>	15	7,203	82,748
LN, V <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub>	8	2,635	<b>93,690</b>	SL, V <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub>	16	6,003	<b>85,623</b>

Tabela 7 – resultados do COT para o reagente percarbonato de sódio

Experimento	Número de Referência	COT final	Redução do COT (%)	Experimento	Número de Referência	COT final	Redução do COT (%)
LF, M <sub>1</sub> , Fe <sub>1</sub>	17	2,968	92,891	LS, M <sub>1</sub> , Fe <sub>1</sub>	25	2,635	93,690
LF, M <sub>1</sub> , Fe <sub>2</sub>	18	2,001	95,208	LS, M <sub>1</sub> , Fe <sub>2</sub>	26	1,401	96,645
LF, M <sub>2</sub> , Fe <sub>1</sub>	19	2,735	93,450	LS, M <sub>2</sub> , Fe <sub>1</sub>	27	2,434	94,169
LF, M <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub>	20	2,034	<b>95,128</b>	LS, M <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub>	28	1,634	<b>96,086</b>
LN, M <sub>1</sub> , Fe <sub>1</sub>	21	2,568	93,850	SL, M <sub>1</sub> , Fe <sub>1</sub>	29	3,068	92,652
LN, M <sub>1</sub> , Fe <sub>2</sub>	22	1,334	<b>96,805</b>	SL, M <sub>1</sub> , Fe <sub>2</sub>	30	2,101	<b>94,968</b>
LN, M <sub>2</sub> , Fe <sub>1</sub>	23	2,401	94,249	SL, M <sub>2</sub> , Fe <sub>1</sub>	31	3,001	92,811
LN, M <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub>	24	1,701	95,926	SL, M <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub>	32	2,168	94,808

Os resultados indicaram uma eficiência na degradação do COT do solo superior a 90%. Comparando-se os resultados dos experimentos que utilizaram ferro endógeno, com aqueles que foram realizados com cátions ferrosos extra, ficou evidenciado que é necessária a introdução dos mesmos, verificado nas maiores degradações do COT. Segundo Jardim (2009), o ferro endógeno não é representativo para a realização do Fenton em solos contaminados. A luz solar, juntamente com a luz negra obtiveram os melhores índices de degradação do COT, justamente pela recuperação de Fe<sup>+3</sup> a Fe<sup>+2</sup>, conforme mostrado na Equação 3. O sistema com isenção de luz, ou com a utilização da luz fluorescente, promoveu boa degradação, mas inferior aos demais. A emissão UV da lâmpada fluorescente comum opera num comprimento de onda entre 400 e 700 nm, fora da faixa ideal para a reação foto-Fenton. Já a lâmpada negra, por não possuir a proteção de fósforo que existe na lâmpada fluorescente, emite uma radiação UV na faixa de comprimento de onda entre 300 e 400 nm, favorável a reação. Comparando-se os resultados entre a lâmpada UV e radiação solar, observa-se que ambos foram muito próximos, sugerindo aplicação solar em regiões abastadas, como no NE do Brasil, diminuindo custos no tratamento. O reagente percarbonato de sódio obteve um resultado melhor que o Fenton, porém, devido ao seu alto custo, comparado com o peróxido de hidrogênio, o torna inviável operacionalmente.

## 5 Conclusão

Os POA mostraram-se eficientes na degradação da matéria orgânica contida no solo



contaminado com óleo diesel. A degradação superou 90% do COT. Entre os processos utilizados, o percarbonato de sódio mostrou-se mais eficiente que o Fenton, mas pela relação custo benefício, o Fenton torna-se mais apropriado. Os experimentos que utilizaram ferro endógeno não conseguiram a mesma eficiência, comparado com aqueles que foram realizados com sulfato ferroso. Os resultados também mostraram que a radiação proveniente da luz solar, e de uma lâmpada negra promoveram resultados próximos, sugerindo o uso da radiação solar, minimizando custos. Finalizando, evidencio-se a eficiência dos POA na degradação do COT do solo contaminado, indicando-o para trabalhos futuros em áreas contaminadas.

### Referências

BOTKIN, D., KELLER, E. **Environmental Science: Earth as a living planet**. 5ª Ed. *Jonh Wiley & Sons, USA, 2005.*

CALVET, R. **Le Sol Propriétés et Fonctions, Tome 1- Constitution et Structure phénomènes aux interfaces**. *Edition France Agricole, 2003.*

CHEN, Y., SUN, Z., YANG, Y. ; KE, Q. **Heterogeneous photocatalytic oxidation of polyvinyl alcohol in water**. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry.*, v. 142, p. 85–89, 2001.

FARES, A, M. **Combination of photo-oxidation processes with biological treatment**. *Tese de Doutorado*, Universitat de Barcelona, Facultat de Química, Department d'enginyeria química/Metal-Lúrgia, 2003.

IIRC, *Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater*, 2ª Ed. p. 172, 2005.

JARDIM, W. **Remediação de áreas contaminadas usando o reagente Fenton Modificado**. *Encontro Sobre Aplicações Ambientais de Processos Oxidativos Avançados*, São Paulo, 2009.

LU, M. C. **Oxidation of chlorophenols with hydrogen peroxide in the presence of goethite**. *Chemosphere*, v. 40(2), p. 125-30, 2000.

MOREIRA, C. A., DOURADO, J. C. **Análise de contaminantes de fase líquida não aquosa (NAPLs) por aplicação do método eletromagnético indutivo (EM)**. *Revista Brasileira de Geofísica*, v 23, n. 3, p. 213-220, 2005.

TIBURTIUS, E. R. L.; PERALTA-ZAMORA, P. ; LEAL, E. S. **Contamination of waters by BTXs and processes used in the remediation of contaminated sites**. *Química Nova*, v. 27, n. 3, p. 441-446, 2004.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers**. Office of Solid Waste and Emergency Response, USEPA: Washington, DC, 2004.