

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E PIRÓLISE DE BORRA DE PETRÓLEO: UMA REVISÃO

Marcelo Mendes Pedroza*

Gláucia Eliza Gama Vieira; Camilla Mendes Pedroza; Rui Felipe de Miranda Rios
Arliza de Castilho Pickler; João Fernandes de Sousa

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar as características químicas e o aproveitamento de borra de petróleo através do processo de pirólise. A borra de petróleo é um resíduo constituído de uma mistura de óleos, areia, pedra e água, gerada em tanques de separação água-óleo (SAO) de refinarias de petróleo. Na maior bacia de exploração de petróleo brasileira, Bacia de Campos, responsável por cerca de 80% do petróleo produzido no país, são geradas cerca de 80 toneladas/mês de borra de petróleo e representa um material de difícil tratamento e disposição final para a indústria do petróleo. Atualmente, tecnologias estão sendo desenvolvidas e representam alternativas viáveis para o tratamento e aproveitamento desse material. Dentre essas alternativas, citam-se: os tratamentos térmicos por pirólise, gaseificação e incineração, a reciclagem da borra com a sua incorporação à massa argilosa para a fabricação de blocos cerâmicos na construção civil e a sua disposição em *landfarming*. A pirólise destaca-se quando comparada com os tipos diferenciados de processos, por gerar produtos (líquidos, sólidos e gasosos), com valores agregados, que podem ser usados, como fonte de combustíveis ou em outros usos relacionados à própria indústria petroquímica.

Palavras chave: Pirólise. Borra de petróleo. Aproveitamento da borra de petróleo

Abstract

This work aims to present the chemical characteristics and utilization of oil sludge by pyrolysis process. Oil sludge is a constituted residue of a mixture of oils, it sands, stone and water, generated into tanks of separation water-oil (SWO) of the refineries of petroleum. In the largest basin of exploration of petroleum Brazilian, Basin of Santos, responsible for about 80% of the petroleum produced at the country are generated about 80 tons/month of oil sludge and represents a residue of difficult treatment and final disposition for the industry of the petroleum. Nowadays, technologies are being developed and they represent viable alternatives for the treatment and use of that residue. Among those alternatives, are mentioned: thermal treatments for pyrolysis, gaseification and incineration, the recycling of the oil shale with your incorporation to the loamy mass for the production of ceramic blocks in the building site and your disposition in landfarming. The pyrolysis stands out when compared with the differentiated types of processes, for generating products (liquids, solids and gaseous), with joined values, that can be used, as source of fuels or in other uses related to the own industry petrochemical.

Keywords: Pyrolysis. Oil sludge. Use of oil sludge

* Universidade Federal do Rio Grande do Norte
mendes_palmas@hotmail.com

Introdução

Nas indústrias de exploração e produção de petróleo, há geração de resíduos sólidos e semi-sólidos com um potencial energético ainda muito alto para que sejam considerados simples resíduos (PICKLER, 2003).

O material mais abundante é o oleoso, o qual apresenta capacidade adesiva de aglomerar areia ou pó de pedra, podendo formar uma massa de resíduo final entre 10 a 20 vezes maior que a inicial. Devido ao elevado teor de óleo, esse tipo de material não pode ser simplesmente disposto em lagos ou diques, dando origem a um problema de relevância ambiental.

No Brasil, a classificação dos resíduos sólidos é realizada de acordo com a NBR 10004. Nessa norma, os resíduos, quanto à origem, podem ser domésticos, comerciais ou de fontes especiais, enquadrando-se neste último os industriais, radioativos, de portos, aeroportos, agrícolas e de serviços de saúde. Quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente, os resíduos podem ser classificados em Classe I (tóxicos ou perigosos) ou Classe II (não perigosos), podendo este último ser subdividido em Classe IIA (resíduos não inertes) ou IIB (resíduo inerte) (ABNT, 2004).

Os materiais sólidos oleosos da indústria de petróleo, em sua maioria, são chamados tradicionalmente de borra oleosa (*oil sludge*), por suas características físico-químicas. A Norma N-2622 (PETROBRAS, 1998) define borra oleosa como um resíduo constituído pela mistura de óleo, sólidos e água, com eventual presença de outros contaminantes, normalmente classificados como Classe I.

A Bacia de Campos é responsável por cerca de 80% do petróleo produzido no Brasil (Guimarães, 2007). Segundo dados da Petrobrás (2003), são geradas cerca de 80 toneladas/mês de borra de petróleo no local. Esse material é proveniente da separação do óleo cru bruto de impurezas sólidas e líquidas nas plataformas marítimas e continentais. Segundo Alves (2003), no ano de 2003 foi registrada uma produção de 500 m³/mês de borras oleosas no Ativo de Produção Sergipe-Terra (ATP/ST), a qual foi acumulada em diques de borra de petróleo, localizados na área de tratamento e destinação final de resíduos daquela unidade operacional da Petrobrás.

O principal objetivo dessa revisão é apresentar as características químicas de borra de petróleo bem como o seu aproveitamento através do processo de pirólise.

Características químicas de borra de petróleo

A composição típica de amostras de borra de petróleo foi determinada por Aires (2002), Tabela 1. As amostras usadas neste trabalho foram obtidas de cinco refinarias localizadas no estado do Rio de Janeiro, Brasil. Segundo o autor, as borras de petróleo expostas ao ar possuem uma quantidade variável de água, 4 a 7% de sedimentos (halita, calcita, caulinita e quartzo) e traços de hidrocarbonetos de petróleo.

Tabela 1 – Composição típica de Borra de Petróleo

Amostra de borra	1	2	3	4	5
Água (%)	55,35	50,32	49,40	45,73	38,69
Óleo (%)	36,02	42,88	43,60	47,84	55,40
Sedimento (%)	7,67	6,64	7,10	5,87	6,62

Fonte: Aires, 2002

A borra de petróleo é constituída quimicamente por vários tipos de compostos orgânicos que apresentam um potencial energético muito elevado para serem tratados como simples resíduos. Esse potencial pode ser transformado de resíduo para matéria-prima a partir da aplicação de tecnologia de reaproveitamento energético, através dos processos de incineração e pirólise (PICKLER et al 2003).

Alves (2003) caracterizou as borras de petróleo de dois tipos de Separadores Água – Óleo (SAO's) no estado de Sergipe. As características inorgânicas e orgânicas (Hidrocarbonetos Totais do Petróleo - HTP e Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos – HPA) das amostras brutas são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Características inorgânicas de amostras de borra de petróleo

Metais	Localidades	
	Nova Magalhães	Santa Bárbara
Arsênio	4,5 mg/kg	6,1 mg/kg
Selênio	ND	ND
Berílio	ND	ND
Vanádio	39 mg/kg	23 mg/kg
Chumbo	130 mg/kg	100 mg/kg
Cromo total	260 mg/kg	190 mg/kg
Mercúrio	8,4 mg/kg	0,3 mg/kg

Fonte: Alves, 2003

ND – Não detectado

Tabela 3 – Características orgânicas de amostras de borra de petróleo coletadas

Parâmetro	Localidades	
	Nova Magalhães	Santa Bárbara
HTP'S Total	50000 mg/kg	70000 mg/kg
HPA'S Total	68 mg/kg	103 mg/kg
Naftaleno	13 mg/kg	37 mg/kg
Acenaftileno	1 mg/kg	1 mg/kg
Acenafteno	3 mg/kg	4 mg/kg
Fluoreno	7 mg/kg	13 mg/kg
Fenantreno	23 mg/kg	34 mg/kg
Antraceno	2 mg/kg	2 mg/kg
Fluoranteno	2 mg/kg	ND
Pireno	4 mg/kg	3 mg/kg
Benzo(a)antraceno	3 mg/kg	1 mg/kg
Criseno	4 mg/kg	4 mg/kg
Benzo(b)fluoranteno	2 mg/kg	3 mg/kg
Benzo(k)fluoranteno	1 mg/kg	1 mg/kg
Benzo(a)pireno	ND	ND
Indeno(1,2,3-cd)pireno	1 mg/kg	ND

Dibenzo(a,h)antraceno	ND	ND
Benzo(ghi)perileno	2 mg/kg	ND

Fonte: Alves, 2003
ND – Não detectado

Os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA) possuem potencial carcinogênico e mutagênico. Devido à habilidade desses compostos migrarem no solo e na água, eles representam um perigo em potencial para as águas de superfícies e subterrâneas. Mesmo estando presentes diluídos em ambiente aquático, representam um grande perigo ao homem e a animais de vida aquática (SEABRA, 2001). Em geral, os HPAs de baixo peso molecular, com 2 ou mais anéis benzênicos, tal como antraceno, fluoreno, naftaleno e fenantreno, não são classificados como carcinogênicos ao homem, mas apresentam significativa toxicidade e outros efeitos adversos aos organismos. Os compostos de alto peso molecular, com mais do que 4 anéis, como benzo(a)fenantreno, benzo(a)pireno e dibenzo(a,i)pireno são na maior parte considerados carcinogênicos (Annibal et al, 2000), por vezes são mutagênicos, para uma ampla variedade de organismos, que incluem invertebrados, peixes, anfíbios, aves, mamíferos e o homem (USEPA, 1993). O Ministério da Saúde, através da portaria 518/2004, apresenta o padrão de potabilidade para substâncias químicas orgânicas que representam risco à saúde. Segundo esse documento, o valor máximo permitido de benzo(a)pireno em água de abastecimento público é de 0,7 µg/L.

Pirólise de resíduos da indústria de petróleo

A gestão adequada dos resíduos sólidos produzidos em processos industriais vem se tornando preocupação crescente na sociedade moderna. Embora significativo avanço tenha ocorrido nas últimas décadas com respeito à redução da geração de resíduos, principalmente nos países desenvolvidos, a solução para os problemas desses rejeitos constitui ainda um dos maiores desafios da humanidade para o século XXI (CASSINI, 2003).

A borra de petróleo gerada em refinarias representa um resíduo de difícil tratamento e disposição final para a indústria petrolífera. Várias tecnologias estão sendo desenvolvidas e representam alternativas viáveis para o tratamento e aproveitamento desse resíduo. Dentre essas alternativas, citam-se os tratamentos térmicos por pirólise, gaseificação e incineração, a reciclagem da borra com a sua incorporação à massa argilosa para a fabricação de blocos cerâmicos para a construção civil e a sua disposição em *landfarming*.

A pirólise pode ser definida como a degradação térmica de qualquer material orgânico na ausência parcial ou total de um agente oxidante, ou até mesmo, em um ambiente com uma concentração de oxigênio capaz de evitar a gaseificação intensiva do material orgânico. A pirólise geralmente ocorre a uma temperatura que varia desde os 400 °C até o início do regime de gaseificação (PEDROZA et al, 2010).

O processo pirolítico apresenta muitas vantagens comparadas a outras alternativas. No processo pirolítico de borra de petróleo são gerados produtos, de valores agregados, que podem ser usados, tais como óleo, gases e carvão, como fonte de combustíveis ou em outros usos relacionados à própria indústria petroquímica (KARAYILDIRIM et al, 2006).

Diante dessa perspectiva, a pirólise tem sido estudada como a alternativa mais vantajosa para o aproveitamento dos resíduos da indústria de petróleo. El Harfi et al, (1999) pirolisaram borra de petróleo usando gás nitrogênio e vapor de água como gases carreadores. As diferenças observadas, em termos de rendimento e da composição do óleo obtido, indicam que a pirólise realizada com o vapor de água apresentou um maior rendimento em óleo, sendo este constituído de substâncias parafínicas. Segundo os autores, o vapor pode colaborar para uma maior evaporação do óleo presente na borra, evitando assim a formação de coque. Foi observado que aumentando a taxa de fluxo de vapor d'água acontece um aumento no rendimento total e de substâncias tais como parafinas, aromáticas e asfaltenos, com diminuição de formação de compostos polares e de quantidade de enxofre no resíduo líquido. Outro parâmetro de processo estudado é a temperatura, nesse sentido, Nazzal (2001) desenvolveu estudos em um reator de leito fixo com as temperaturas do processo oscilando entre 673 e 893 K e utilizando nitrogênio e a mistura de nitrogênio e vapor como gás carreador. Na fração gasosa, os seguintes gases foram analisados: H₂, CO, CO₂ e hidrocarbonetos de C₁ a C₄. Os resultados da pesquisa mostraram que para ambas as atmosferas em estudo, com o aumento da temperatura do leito de 673 a 793 K, houve um aumento no rendimento da fração oleosa e da razão alceno/alceno.

A determinação de metais pesados em borras de petróleo e no bio-óleo obtido a partir da aplicação da pirólise foi estudada por Pickler et al, (2003), nesse estudo, os autores identificaram uma redução na concentração de metais no bio-óleo, o que mostrou que o processo pode ser uma alternativa para se efetuar o tratamento do resíduo da borra de petróleo, obtendo no final uma fase líquida com considerável poder calorífico, Tabela 4.

Tabela 4 – Concentrações de Níquel e Vanádio em amostra de petróleo bruto e óleo

Amostra	Concentração de Metais (mg/L)	
	Níquel	Vanádio
Petróleo bruto	8	22
Óleo de conversão térmica	< 1	< 5

Fonte: Adaptado de Pickler et al, 2003

Oliveira (2006) caracterizou os resíduos provenientes da atividade de exploração e produção de petróleo e gás *offshore* por meio de ensaios de caracterização de classes poliméricas e de análises térmicas. As amostras de resíduos *offshore*, depois de caracterizadas, foram submetidas à pirólise em atmosfera inerte a 723 K. Os líquidos pirolíticos obtidos por esse tratamento térmico foram caracterizados por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG/EM) com o objetivo de se identificar os principais compostos presentes, sendo as parafinas e olefinas encontradas em maiores concentrações. Tais compostos apresentam elevados poderes caloríficos.

Liu et al, (2008) estudaram o efeito da temperatura no processo de pirólise de borra de petróleo na China e no rendimento de obtenção das frações líquida e gasosa. Foi

observado que, com o aumento da temperatura do processo de 623 para 823 K, o rendimento das frações sólidas, líquidas e gasosas variou de 67,00% - 56,00%, 25.60%–32.35%, e 7.40%– 11.65%, com poderes caloríficos correspondentes variando entre 34.4–13.8 MJ/kg, 44.41–46.6 MJ/kg, e 23.94–48.23 MJ/Nm³, respectivamente. Segundo a pesquisa, a melhor temperatura encontrada para a conversão da fase sólida para as fases líquidas e gasosas foi a de 773 K. A fase líquida obtida nesse estudo era formada principalmente por alcanos e alcenos (C5–C29), e a fase gasosa era constituída basicamente por hidrocarbonetos (C1 – C4), H₂, CO e CO₂.

A fase gasosa da pirólise de borra de uma refinaria de petróleo, localizada no norte Taiwan, foi caracterizada por Chang et al, (2000). Segundo os pesquisadores, o poder calórico de 44,7 MJ/kg foi encontrado para a borra em base seca e o valor de 24,6 MJ/kg em base úmida. A borra estudada, em base úmida, contém aproximadamente 39.15, 1.88 e 58,97 % de umidade, cinzas e substâncias combustíveis, respectivamente. Em base seca contém 83,94% de C elementar, o que sugere que a borra pode ser um valioso recurso. Tal processo de pirólise foi conduzido utilizando como gás carreador o nitrogênio a uma temperatura de 378-873 K. Segundo os autores, as reações de pirólise são complexas e significativas a temperaturas entre 450-800 K. Na pirólise da borra foram obtidos os rendimentos de (69,63%) para o óleo líquido, (3,57%) para os produtos gasosos e (13,7%) para os resíduos sólidos, sendo que houve uma recuperação de 86,3% da borra na forma de produtos pirolíticos. Os produtos líquidos obtidos no processo apresentaram poder calorífico de 45,4 MJ/Kg. Os principais produtos gasosos caracterizados (gases não condensáveis a 298K) foram CO₂, hidrocarbonetos, H₂O e CO com os seguintes rendimentos (50,88%), (25,23%), (17,78%) e (6,11%) respectivamente. Os hidrocarbonetos formados consistiram principalmente em parafinas e olefinas de baixo peso molecular (C₁-C₂, 51,61%), sendo 713 K a temperatura de máxima produção de hidrocarbonetos. Antes de 663 K não foi detectada a presença de CO e a formação de hidrocarbonetos pode ser negligenciada antes de 538 K. Sete grupos de hidrocarbonetos foram detectados na fração gasosa (Tabela 5).

Tabela 5 – Rendimento dos sete grupos de hidrocarbonetos presentes na fração gasosa

Hidrocarbonetos presentes na fração gasosa	Rendimento (%)
C ₁₋₂	51,61
C ₆	17,92
C ₅	11,53
C ₃₋₄	9,24
C ₇	7,29
C ₈	2,34
C ₉	0,04

Fonte: Chang et al, 2000

As concentrações de benzeno (B), tolueno (T), etilbenzeno (E) e xileno (X) foram determinadas na fração gasosa obtida no processo, Tabela 6. O benzeno foi o composto encontrado em maior concentração (63,19% da massa total).

Tabela 6 – Rendimento dos grupos de hidrocarbonetos presentes na fração gasosa

Gases BTEX	Concentração ($\mu\text{g/L}$)	Percentual (%)
Benzeno	158,39	63,19
tolueno	73,75	29,42
etilbenzeno	8,59	3,43
iso-xileno	9,92	3,96

Fonte: Chang et al 2000

Catálise em processos de tratamento térmico de borra de Petróleo

Diversos catalisadores estão sendo utilizados nos processos de tratamento térmico de borra de petróleo, visando-se obter um maior rendimento de obtenção das frações líquida e gasosa, visto que são essas as frações com maiores poderes caloríficos (SHIE et al, 2003).

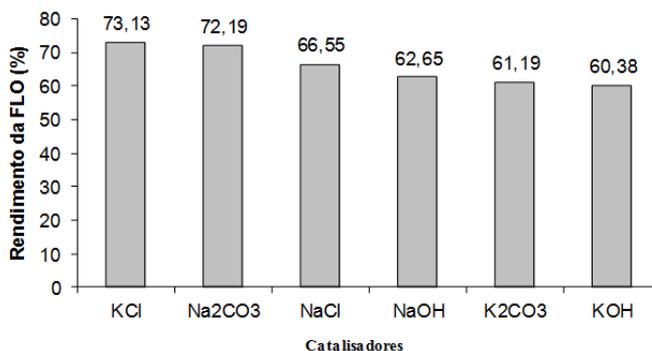
Williams (2001) estudou a influência do uso de zeólita na catálise de pirólise de borra de petróleo do nordeste do Paquistão, em atmosfera de nitrogênio. Para isso, foram feitos dois experimentos, um com a presença do catalisador e o outro sem a zeólita, sendo assim considerado o experimento controle. O tamanho dos poros do catalisador era de 5,5 Å e sua área superficial de 300 m²/g. A temperatura final de 793 K foi mantida por 1 hora e a taxa de aquecimento do processo era de 283 K/min. A influência do tempo de residência do vapor também na catálise foi investigada. Nesse estudo, foram determinados os rendimentos e a composição dos gases antes e após catálise. Além disso, foram investigados os conteúdos de nitrogênio total, enxofre e hidrocarbonetos aromáticos no óleo obtido. Os resultados mostraram que os rendimentos de obtenção de óleo após catálise foram reduzidos, e consequentes elevados rendimentos de conteúdos de gases e coque.

Os principais gases obtidos na pirólise da borra foram CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆, C₃H₈ e outros hidrocarbonetos gasosos em menores concentrações. O principal papel do catalisador foi converter longas cadeias de alcanos e alcenos presentes no óleo para compostos de baixo peso molecular, de cadeias curtas tais como algumas espécies alquil e iso substituídos e hidrocarbonetos aromáticos. O total de nitrogênio e enxofre foi reduzido no conteúdo do óleo com o emprego do catalisador. A influência do longo tempo de residência do vapor estava relacionada com um aumento na formação de hidrocarbonetos aromáticos, redução de compostos de nitrogênio e enxofre no óleo obtido na pirólise.

Shie et al, (2003) utilizaram borra de petróleo de uma refinaria localizada em Taiwan durante o processo de pirólise, na presença de atmosfera de nitrogênio. Nesse estudo, foi avaliada a influência de compostos de sódio e potássio, utilizados como catalisadores do processo pirolítico. Os catalisadores foram divididos em dois grupos: (1) compostos de sódio (NaOH, NaCl e Na₂CO₃), e (2) compostos de potássio (KCl, KOH e K₂CO₃). A temperatura final do processo foi de 740 K e a fase orgânica líquida foi coletada numa faixa de temperatura de 378 a 740 K em todas as situações experimentais. A massa do catalisador representava 10% da massa de borra. Os maiores rendimentos da fase líquida

orgânica foram observados nos experimentos que empregaram os catalisadores KCl (73,13%) e Na_2CO_3 (72,19) (Gráfico 1). O KOH foi o catalisador que proporcionou a menor recuperação da fase líquida orgânica (60,38%).

Gráfico 1 – Rendimento da fração líquida orgânica, obtida através de pirólise de borra de petróleo



Fonte: Adaptado de Shie et al 2003

Shie et al, (2003) pesquisaram a influência de compostos de alumínio e ferro na catálise de pirólise de borra de uma refinaria de petróleo, em atmosfera de nitrogênio. Os catalisadores empregados foram Al, Al_2O_3 , AlCl_3 , Fe, Fe_2O_3 , $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, FeCl_3 e $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. A taxa de aquecimento empregada no processo foi de 5,2 K/min e utilizaram uma massa de 1000 mg de borra e 100 mg de cada catalisador para todos os experimentos. 740 K foi a temperatura final do processo e o bio-óleo foi coletado numa faixa de temperatura de 378 a 740 K em todas as situações experimentais. Para o aumento de conversão, os catalisadores atuaram com maior eficiência na seguinte ordem: $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{AlCl}_3 > \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{FeCl}_3 > \text{Al} > \text{Fe}$. Em se tratando do rendimento da fração líquida do processo, foi verificado que os catalisadores aumentaram a quantidade líquida na ordem: $\text{Al} > \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} > \text{Fe} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{FeCl}_3 > \text{AlCl}_3 > \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} > \text{Al}_2\text{O}_3$.

Wang et al, (2007) estudaram pirólise de borras de tanques de armazenamento de refinarias de petróleo em diferentes condições: (1) taxas de aquecimento entre 278 e 293 K/min; (2) presença de diferentes tipos de catalisadores (NaOH e CuO) e (3) temperaturas finais do processo entre 673 e 973 K. O reator pirolítico de quartzo foi mantido em atmosfera de nitrogênio gasoso a uma vazão de 100 mL/min. A maior recuperação da fase orgânica (óleo) aconteceu quando se aplicou uma taxa de aquecimento de 283 K/min a uma temperatura final do processo de 773 K. Na temperatura de 973 K, observou-se a menor concentração da fase sólida e a maior concentração da fase gasosa, o que mostra uma maior conversão da fase sólida em fase gasosa com o aumento da temperatura do processo. Essa elevação de temperatura não favoreceu a recuperação da fase orgânica. Para se verificar a influência da catálise nesse processo, a amostra de borra foi misturada com os catalisadores, e então pirolisada a uma temperatura final de 773 K. A massa de cada

catalisador representava 3% da massa da amostra de borra de petróleo. Os resultados mostraram que a presença dos compostos NaOH e CuO não influenciou no aumento da recuperação da fase oleosa, mas estimulou a produção de um maior rendimento da fase gasosa.

Considerações Finais

As variáveis empregadas na pirólise da borra de petróleo, tais como temperatura final, taxa de aquecimento e tipo de atmosfera, têm grande influência no rendimento e composição das frações sólida, gasosa, líquida orgânica e aquosa obtidas no processo. O aumento da temperatura do reator pirolítico pode direcionar a obtenção de maiores rendimentos da fração oleosa e gasosa, bem como um baixo conteúdo da fração sólida. A pirólise da borra realizada em atmosfera de vapor de água pode proporcionar a obtenção de um maior rendimento do óleo, este constituído de substâncias parafínicas.

Os resultados, aqui apresentados, mostram que o tratamento térmico por pirólise é uma alternativa ambientalmente correta a ser empregada no reaproveitamento dos resíduos sólidos da indústria de petróleo (borra e outros óleos). As frações líquidas e gasosas, obtidas durante o processo, apresentam elevados poderes caloríficos que podem ser reaproveitados no próprio processo pirolítico ou entre outras atividades na própria indústria. O resíduo sólido gerado durante o processo também pode ser reaproveitado na construção civil. Sendo assim, a pirólise pode ser considerada uma forma adequada de se aproveitar o potencial energético da borra de petróleo, além de ser uma alternativa viável para se eliminar os impactos ambientais causados por esse resíduo altamente poluidor.

Referências

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004. **Resíduos sólidos:** Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

AIRES, J. R. **LTC no manejo de borra de petróleo.** Tese (Doutorado em Geoquímica Ambiental)-Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, 2002, 125p.

ALVES, M. R. F. V. **Reciclagem de borra oleosa:** uma contribuição para a gestão sustentável dos resíduos da indústria de petróleo em Sergipe. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente)-Universidade Federal de Sergipe. Aracaju, 2003, 191p.

ANNIBAL, D. P. N. et al. Avaliação da contaminação humana por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e seus derivados nitratados (NHPAs): uma revisão metodológica. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, p. 765-773, 2000.

CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos orgânicos e aproveitamento do biogás.** Rio de Janeiro: ABES, 2003, 210 p.

CHANG, C. Y. et al. Major products obtained from the pyrolysis of oil sludge. **Energy & Fuels**, Washington DC, v. 14, p. 1176-1183, 2000.

- EL HARFI, K.; MOKHLISSE, A.; BEN CHANÂA, M. Effect of water vapor on the pyrolysis of the Moroccan (Tarfaya) oil shale. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Canadá, v. 48, p. 65–76, 1999.
- GUIMARÃES, A. K. V. **Extração do óleo e caracterização dos resíduos da borra de petróleo para fins de reuso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007.
- KARAYILDIRIM, T.; YANIK, J.; YUKSEL, B. Characterization of products from pyrolysis of waste sludge's. **Energy Fuel**, Washington DC, v. 85, p. 1498-1508, 2006.
- LIU, J.; SONG, W.; NIE, Y. Effects of temperature on pyrolysis products of oil sludge. **Environmental Science & Engineering**, China, v. 2, p. 8–14, 2006.
- NAZZAL, J. M. Gas evolution from the pyrolysis of Jordan oil shale in a fixed-bed reactor. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, New York, v. 65, p. 847-857, 2001.
- OLIVEIRA, M. L. **Caracterização e pirólise dos resíduos da Bacia de Campos: análise dos resíduos da P-40**. Dissertação (Mestrado em Química Ambiental)-Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006, 192p.
- PEDROZA, M. M. et al. Produção e tratamento de lodo de esgoto: uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, p. 147-157, 2010.
- PETROBRAS. **N-2622**: Classificação, armazenamento temporário, transporte, tratamento e disposição de resíduos sólidos oleosos. Rio de Janeiro, 1998.
- PICKLER, A. C. et al. Study on nickel and vanadium removal in thermal conversion of oil sludge and oil shale sludge. **Journal of Physique**, IV, France, v. 107, p. 1255-1258, 2003.
- SEABRA, P. N. Uso de biorremediação em áreas impactadas pela indústria do petróleo. **Embrapa Meio Ambiente**, São Paulo, p. 41-59, 2001.
- SHIE, J. et al. Pyrolysis of oil sludge with additives of sodium and potassium compounds. **Resources, Conservation and Recycling**, Canadá, v. 39, p. 51-64, 2003.
- SUELVE, I; MOLINER, R; LÁZARO, M. J. Synergetic effects in the co-pyrolysis of coal and petroleum residue: influences of coal mineral matter and petroleum residue mass ration. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Canadá, v. 55, p. 29-41, 2000.
- USEPA. Environmental Protection Agency. **Provisional guidance for quantitative risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons**. Washington, EPA-600/R-93-089, 1993.
- WANG, Z. et al. Low temperature pyrolysis characteristics of oil sludge under various heating conditions. **Energy Fuels**, Washington DC, v. 21, p. 957-962, 2007.
- WILLIAMS, P. T.; CHISHTI, H. M. Influence of residence time and catalyst regeneration on the pyrolysis–zeolite catalysis of oil shale. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Canadá, v. 60, p. 187–203, 2001.