CADERNOS MACAMBIRA

ISSN 2525-6580, Serrinha, Bahia - v.11, n. 2, 2026. https://doi.org/10.59033/cm.v11.i2.1955.
Anais do II Congresso de Educação do IF Baiano Campus Guanambi (CEIF)

ARTIGO / ARTICLE
Área temática: Química, Indústria e Sociedade

REDUÇÃO DO TEOR DE CARBONO RESIDUAL EM ÓLEO CRU POR MEIO DA DIGESTÃO ASSISTIDA EM FORNO DE MICRO-ONDAS

REDUCING RESIDUAL CARBON CONTENT IN CRUDE OIL THROUGH MICROWAVE OVEN-ASSISTED DIGESTION

Enoc Lima do Rego[1]

[1] Doutor em Química pela Universidade de Brasília. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Campus Guanambi. E-mail: el.enoc.lima@gmail.com..

Recebido: 07/10/2025 - **Revisado**: 15/10/2025 - **Aceito**: 07/05/2026 - **Publicado**: 09/05/2026

RESUMO: O óleo cru é encontrado em fraturas, em geral rochas sedimentares, em estados que variam desde mais fluídos até o estado sólido. O petróleo, a depender da rocha reservatória de onde o mesmo foi extraído, pode apresentar diferentes características físico-químicas como viscosidade, teor de água, densidade e composição química. Para a realização das análises químicas do óleo é necessário o preparo da amostra, a fim de torná-la mais apropriada para a análise. Desta forma, este trabalho teve como objetivo propor uma metodologia de preparo de amostra de óleo cru por meio da digestão assistida em forno de micro-ondas, sendo avaliada a sua eficiência por meio da determinação do teor de carbono residual (TCR). A determinação do teor de carbono foi realizada por meio do uso do analisador elementar CHNS. As amostras de óleo cru foram digeridas por meio de da decomposição por via úmida assistida em forno de micro-ondas e foi determinado o teor de carbono residual nos extratos de óleo empregando o analisador de carbono TOC. Os resultados apresentaram que os óleos possuem teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio dentro da faixa reportada na literatura. Os resultados do TCR mostraram-se eficientes com teores de carbono residual abaixo de 30% com massa de amostra 100 mg, mas ao aumentar a massa de óleo obteve-se resultados com teores mais elevados. Apesar disso, os resultados foram satisfatórios, possuindo variações estreitas em relação aos diferentes tipos de óleo. Como perspectiva, será realizada a determinação de metais que possibilitem a caracterização química do óleo para a determinação da rocha fonte.

Palavras-Chave: Petróleo. Preparo de amostra. Rocha fonte.

ABSTRACT: Crude oil is found in fractures, generally in sedimentary rocks, in states ranging from fluid to solid. Depending on the reservoir rock from which it was extracted, oil can present different physicochemical characteristics, such as viscosity, water content, density, and chemical composition. Chemical analysis of the oil requires sample preparation to ensure optimal analysis. Therefore, this study aimed to propose a methodology for preparing crude oil samples using microwave-assisted digestion, evaluating its efficiency by determining the residual carbon content (RCC). Carbon content was determined using a CHNS elemental analyzer. The crude oil samples were digested using microwave-assisted wet decomposition, and the residual carbon content in the oil extracts was determined using a TOC carbon analyzer. The results showed that the oils had carbon, hydrogen, and nitrogen contents within the range reported in the literature. The TCR results were effective with residual carbon contents below 30% and a sample mass of 100 mg, but increasing the

Este trabalho está licenciado sob uma Licença Internacional Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

oil mass yielded higher levels. Despite this, the results were satisfactory, with narrow variations across the different oil types. In the future, metals will be determined to enable chemical characterization of the oil for source rock identification.

Keywords: Oil. Sample preparation. Source rock.

INTRODUÇÃO

O petróleo (do latim *petra*, pedra e *oleum*, óleo) é uma mistura complexa de hidrocarbonetos que ocorrem na Terra na forma líquida, e constitui uma importante parcela dos combustíveis fósseis primários (Prauchner, *et al.*, 2022). A sua composição química pode variar de acordo com a formação geológica, pois diferentes fontes podem não ser completamente idênticas, embora suas proporções apresentem uma faixa de variação relativamente pequena, por exemplo: carbono (83-87%), hidrogênio (10-14%), nitrogênio (0,1-2%), enxofre (0,5-6%), oxigênio (0,1-1,5%) e metais em concentrações menores que 1000 $mg.L^{-1}$ (Evans *et al.*, 1971; Santos; Wisniewski Junior, 2023).

Os estudos de metais associados à matéria orgânica, principalmente em baixas concentrações, são muito comuns em diversas matrizes ambientais, porém, na área de geoquímica ambiental, constitui-se uma importante ferramenta para a exploração do petróleo, pois conteúdos metálicos podem fornecer informações como: (1) origem do óleo cru, (2) maturidade, (3) migração e o (4) tipo/família. Considerando o conteúdo de matéria orgânica, concentrações elevadas de metais geralmente estão associadas à enxofre e asfaltenos (Tonietto, 1995), sendo esses últimos classificados como petróleos ácidos pela American Petroleum Institute (API), por apresentarem 2,5% de enxofre na sua composição (Pedrozo *et al.*, 2002; Santos; Wisniewski Junior, 2023).

Os elementos tendem a se associar nos processos geológicos devido às suas mobilidades relativas. Em um conjunto de ambientes nos quais dois elementos estão associados, a sua razão permanece relativamente constante, de modo que os seus teores e movimentação serão acompanhados durante a maioria dos processos do ambiente hipogênicos (Licht, 1998). A rocha fonte do petróleo contém quantidades mensuráveis de muitos metais traços e elementos

terras raras (ETR), onde são incorporados na forma de complexos parafirínicos a partir da biomassa e durante a formação da sedimentação (Akinlua *et al.*, 2016; Fontana, 2023).

A classificação dos óleos, quanto a suas características geoquímicas, é um tema importante para a sua exploração, pois permite com que óleos de uma bacia possam ser agrupados de acordo com uma fonte comum ou a um tipo de matéria orgânica, que poderá ajudar a identificar a possível presença de mais famílias de óleos (Cavalcante; Bastos; Pereira, 2022). O estudo da discriminação geoquímica deles torna-se uma ferramenta útil para investigação de novas jazidas, assim como serve para investigar a possível origem de óleo de poluição por derramamento ou vazamento no oceano, a fim de responsabilizar a empresa causadora.

O estudo da concentração de metais no petróleo é importante, também, nos processos de obtenção dos seus derivados como no procedimento de destilação, pois a presença de compostos metálicos provoca o envenenamento dos catalisadores usados para remover enxofre e nitrogênio, assim como no craqueamento catalítico (Carvalho, 2021). Os compostro metálicos envenenam os catalisadores utilizados nos diferentes tipos de processo de refino (separação, conversão, tratamento e processos auxiliares) e comprometem a qualidade do produto final, no que diz respeito à estabilidade (Carvalho, 2021; Gomes, 2022).

A quantificação dos metais presentes no óleo pode ser determinada por diversas técnicas espectroscópicas, dentre estas, a espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Para o uso desta técnica é necessário o preparo da amostra, pois a prevalência de átomos de carbono e hidrogênio nos espectros introduzem problemas que, geralmente, degradam os limites de precisão e detecção no ICP-MS (Castro *et al.*, 2009). Desta forma, torna-se necessário estabelecer um protocolo de abertura de amostras dos diferentes tipos de óleos, a fim de torná-la mais adequada para os procedimentos de análise.

O preparo da amostra é considerado como etapa crítica do procedimento analítico, que busca transformar a forma original da amostra em uma forma mais

conveniente e/ou mais apropriada para a realização da análise (Souza, 2007; Monteiro; Do Egito, 2024). Dessa forma, procura-se minimizar erros de modo a garantir uma boa exatidão e uma boa precisão do método analítico, principalmente, em matrizes complexas, como ocorre com o óleo cru.

A eficiência do preparo da amostra pode ser avaliada pelo teor de carbono residual (TCR), e este pode ser reduzido com a adição de agentes oxidantes fortes combinados a sistemas fechados (bombas de teflon) com aquecimento em bloco digestor ou micro-ondas (Souza, 2007). O uso do micro-ondas garante rapidez no procedimento de preparo da amostra, além de redução dos riscos de contaminação.

Os metais, além de serem uma importante ferramenta de informação sobre a rocha fonte do petróleo e destilação para obtenção dos seus derivados, servem também para avaliar o quanto destes serão lançados para atmosfera pelo seu uso como combustível (Duyck *et al.*, 2007; Souza, 2024). Tais efeitos podem ser danosos para o meio ambiente. Nesta perspectiva, este trabalho teve como objetivo reduzir o teor de carbono residual em 4 (quatro) tipos de óleo cru de origem *onshore* e *offshore* para ser utilizado como metodologia de abertura de amostras para a determinação de metais.

METODOLOGIA

Amostras

As amostras de óleo foram disponibilizadas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), localizada na cidade de Brasília-DF. Os tipos de óleo cedidos foram dois leves (um brasileiro e outro árabe), médio (brasileiro) e pesado (brasileiro).

Equipamentos e Reagentes

Para a determinação do teor de carbono no óleo bruto foi utilizado o analisador elementar CHNS da marca *Perkin Elmer*, modelo EA 2400 Series II, no modo de análise CHN. As amostras de óleo cru foram digeridas, através do procedimento de decomposição por via úmida assistida em forno de micro-ondas (MW AD), modelo *MARS 8,* equipado com rotor para 8 (oito) vasos, do

Laboratório de Química Analítica da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB). Após a digestão, foi determinado o TCR nos extratos de óleo empregando o analisador de carbono TOC-L CPH/CPN da *Shimadzu*.

Para a preparação das soluções necessárias para o experimento foi utilizada água purificada em um sistema Milli-Q® (*Milli-Q® UltrapureWaterPurification Systems*, *Gradient System*,*Millipore*, apresentando resistividade final de 18,2 MΩ.cm. O ácido nítrico concentrado P.A. (HNO_3), utilizado para a decomposição das amostras por via úmida, foi destilado abaixo de seu ponto de ebulição, em sistema de destilação de quartzo (modelo *duopur*, *SubboilingDistillation System,* Milestone). Uma solução de peróxido de hidrogênio P.A. (H_2O_2, da *Sigma Aldrich*) foi utilizada na decomposição das amostras por via úmida.

Digestão do óleo por via úmida assistida por micro-ondas

A decomposição por via úmida das amostras de óleo em um forno de micro-ondas foi realizada conforme a programação proposta (tabela 1).

Tabela 1. Programa de aquecimento utilizado para a decomposição da matéria orgânica, em três tipos de óleo cru, com massa de 100 mg, por via úmida assistida por radiação micro-ondas (Barreiras, 2015).

Etapa	T (°C)	Tempo de rampa (min)	Tempo de permanência (min)	Potência (W)
1	90	5	10	70
2	170	5	10	80
3	200	2	20	80
4	50	5	10	0

Fonte: Próprio autor (2016).

Para este procedimento foi realizada, a digestão de 100 mg de cada amostra de óleo bruto (leve, médio e pesado), previamente homogeneizados, e transferidos para os vasos de teflon. Em seguida, foram adicionados 6 mL de HNO_3 concentrado e 2 mL de H_2O_2 35% (v/v). Os frascos, após 20 minutos de reação, foram fechados e colocados no rotor e levados ao interior da cavidade do forno. A mesma programação foi utilizada para a digestão de 250 mg de amostra de cada óleo.

Para verificar a influência do tempo de decomposição, foram criadas duas programações com o aumento de uma etapa na no processo de digestão de 250

mg de óleo cru, conforme observa-se nas tabelas 2 e 3. Nestas programações foram adicionados 15 mL de HNO_3 concentrado e 5 mL de H_2O_2 35% (v/v).

Tabela 2. Segunda programação da decomposição da matéria orgânica, em três tipos de óleo cru, com massa de 250 mg, por via úmida assistida por radiação microondas (Barreiras, 2015).

Etapa	T°C	Tempo de rampa (min)	Tempo de permanência (min)	Potência (W)
1	80	5	10	40
2	100	5	10	40
3	170	5	10	80
4	200	2	20	80
5	50	5	10	0

Fonte: Próprio autor (2016).

Tabela 3. Terceira programação da decomposição da matéria orgânica, em três tipos de óleo cru, com massa de 250 mg, por via úmida assistida por radiação micro-ondas (Barreiras, 2015).

Etapa	T°C	Tempo de rampa (min)	Tempo de permanência (min)	Potência (W)
1	80	5	10	40
2	100	5	10	40
3	170	2	15	80
4	200	5	25	80
5	50	5	10	0

Fonte: Próprio autor (2016).

Para todas as programações de digestão duas amostras branco foram digeridas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização elementar dos óleos brutos

Para a determinação da massa real de carbono presente nas amostras de óleo utilizadas no experimento de digestão foi utilizado o analisador elementar, onde as medidas são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4. Análise elementar do teor de carbono, hidrogênio e nitrogênio presentes nas amostras de óleo (Barreiras, 2015).

Amostras	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Nitrogênio (%)
Óleo leve 1	82,97	13,75	0,31
Óleo leve 2	82,69	12,26	0,94
Óleo Médio	86,86	12,89	0,87
Óleo Pesado	87,29	10,78	0,36

Fonte: Próprio autor (2016).

Os resultados mostram que os óleos possuem teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio dentro da faixa reportada na literatura, com carbono (83-

87%), hidrogênio (10-14%) e nitrogênio (0,1-2%) (Evans *et al.*, 1971; Santos; Wisniewski Junior, 2023). Os óleos com menor °API (*American Petroleum Institute*) possuem um maior teor de carbono em sua composição devido ao aumento da sua viscosidade, conforme classificação descrita por Lima (2025).

Com o resultado do teor de carbono, foi possível determinar, a partir da massa de cada óleo pesada para as digestões, a massa de carbono utilizada e assim obter a diferença entre a quantidade de carbono inicial e após a digestão ácida.

Caracterização físico-química dos óleos

A densidade ou °API e a viscosidade são propriedades físicas utilizadas para complementar a descrição e classificação do petróleo. Estas medidas foram realizadas a fim de se obter uma caracterização para os diferentes tipos de óleos. Desta forma, é possível evidenciar qual a influência destas características físicas na eficiência da digestão ácida. Os resultados obtidos das medidas encontram-se na tabela 35.

Tabela 5. Propriedades físicas das amostras de óleo cru (Barreiras, 2015).

Amostras	Densidade (kg/cm³)	Viscosidade (mm²/s)
Óleo leve 1	0,79	2,59
Óleo leve 2	0,87	7,63
Óleo médio	0,89	22,21
Óleo pesado	0,90	86,37

Fonte: Próprio autor (2016).

A viscosidade irá aumentar proporcionalmente ao aumento da densidade do óleo devido a presença de diferentes compostos, especialmente hidrocarbonetos de cadeia mais longa, que possuem um maior número de átomos de carbono e consequentemente, maior peso molar.

Digestão das amostras de óleo cru em forno de microondas

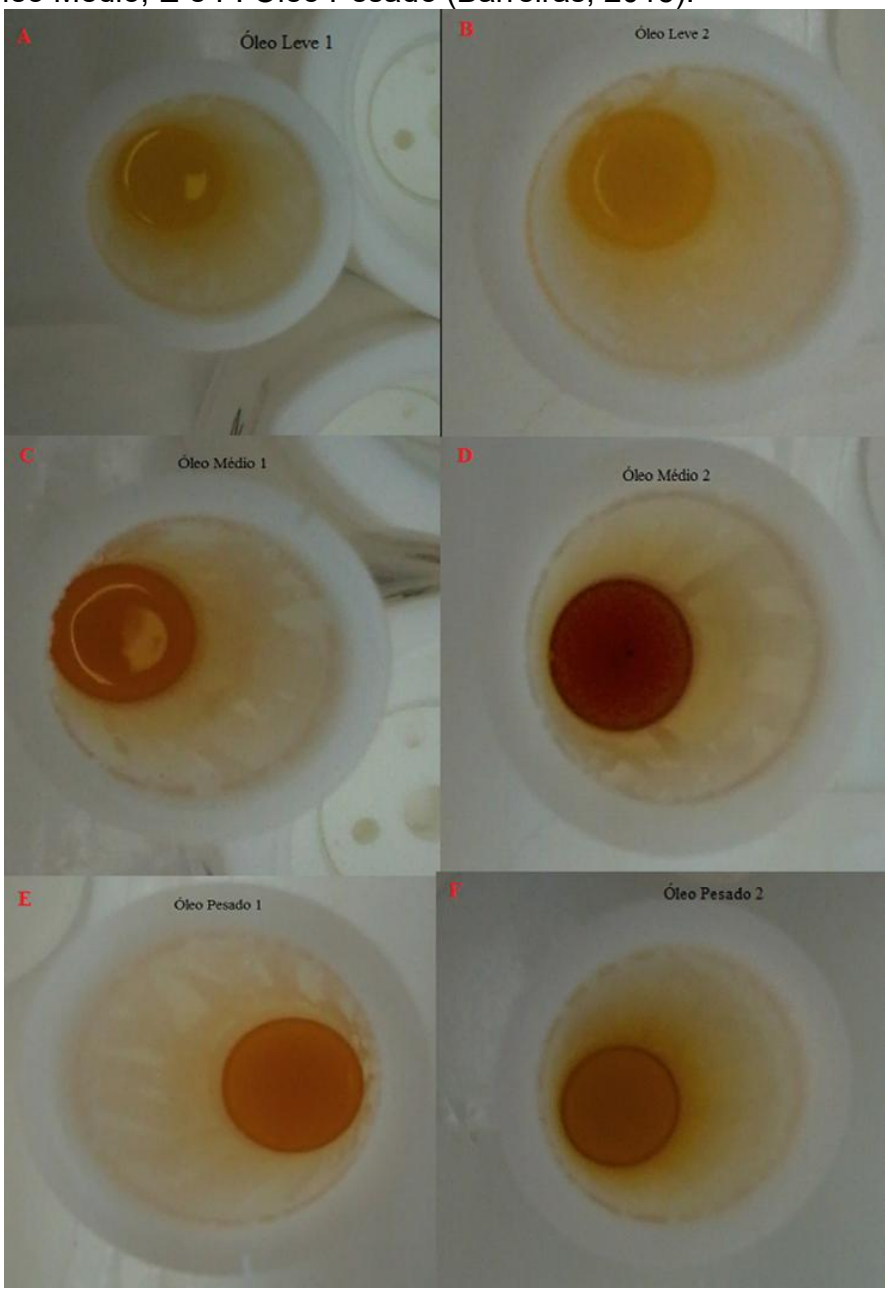
Os extratos obtidos na primeira programação (Tabela 1) estão expostos na figura 1, onde foram utilizados 100 mg de cada amostra de óleo e adicionado 6 mL HNO_3 2% (v/v) e 2 mL H_2O_2.

Após a digestão, visualmente, as amostras mostraram-se totalmente decompostas. A fim de verificar a eficiência da digestão com a mesma programação, aumentou-se a massa das amostras para 250 mg, utilizando o

Cadernos Macambira - ISSN 2525-6580, Serrinha, Bahia - v.11, n. 2, p. e011021955, 2026.
https://doi.org/10.59033/cm.v11n2.1955 - Anais do II Congresso de Educação do IF Baiano Campus Guanambi (CEIF)

mesmo volume dos reagentes da digestão anterior, conforme observa-se na figura 2.

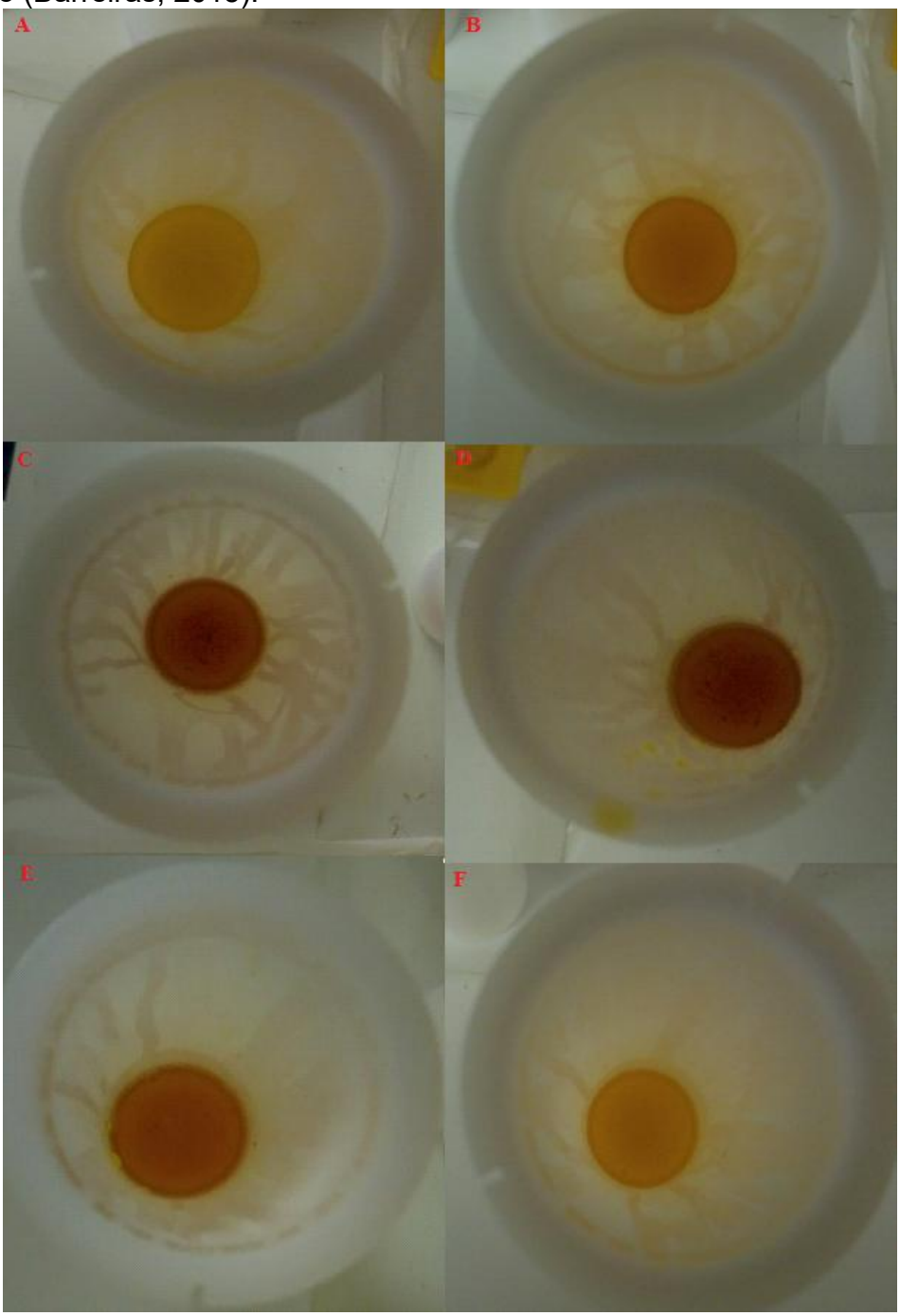
Figura 1. Extratos das amostras após decomposição de 100 mg de de óleo cru, utilizando a primeira programação para digestão, da tabela 1. A e B: Óleo Leve; C e D: Óleo Médio; E e F: Óleo Pesado (Barreiras, 2015).



Fonte: Próprio autor, 2016.

Figura 2. Extratos após decomposição de 250 mg de amostra, utilizando a primeira programação com volume de reagentes iguais aos utilizados para

decompor 100 mg de amostra. A e B: Óleo Leve; C e D: Óleo Médio; E e F: Óleo Pesado (Barreiras, 2015).

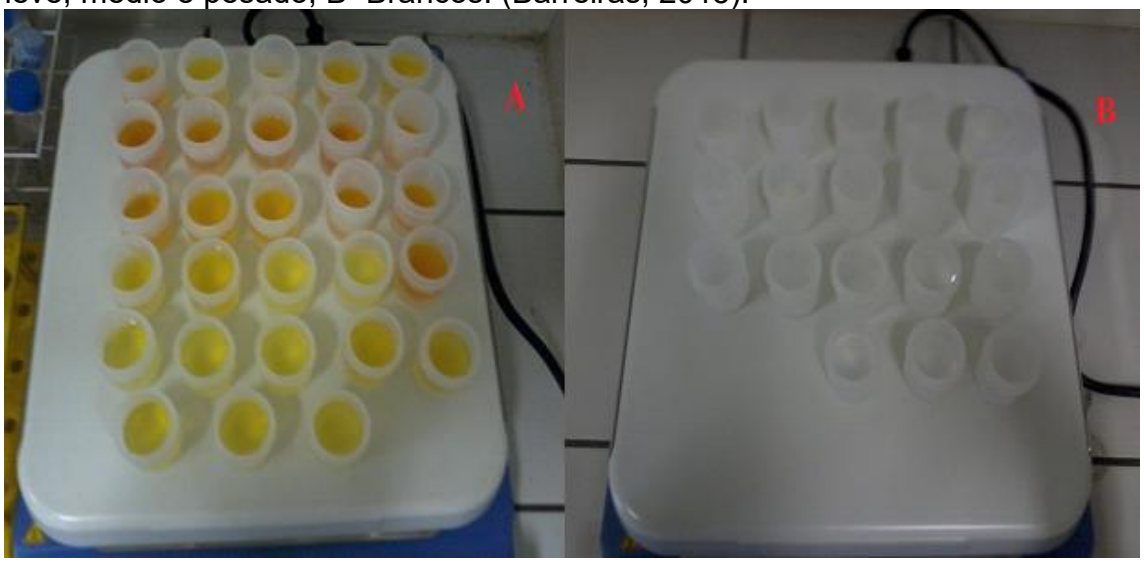


Fonte: Próprio autor, 2016.

Observou-se, visualmente, que para a duplicata dos óleos leves (A e B) a digestão apresenta-se totalmente decomposta sem a presença de resíduos sólidos, enquanto os óleos médios (C e D) e pesados (E e F) apresentou-se com alguns sólidos nos extratos.

A segunda e a terceira programação foram realizadas com 100 mg e adição de 6 mL HNO_3 2% (v/v) e 2 mL H_2O_2 e 250 mg de amostra com adição proporcional dos regentes conforme o aumento da massa. Os digeridos, após cada programação, foram evaporados até próximo a secura e redissolvidos com 10 mL de HNO_3 2% (v/v), como observa-se na figura 3.

Figura 3. Evaporação das amostras digeridas para a pré-concentração. A=óleos leve, médio e pesado; B=Brancos. (Barreiras, 2015).



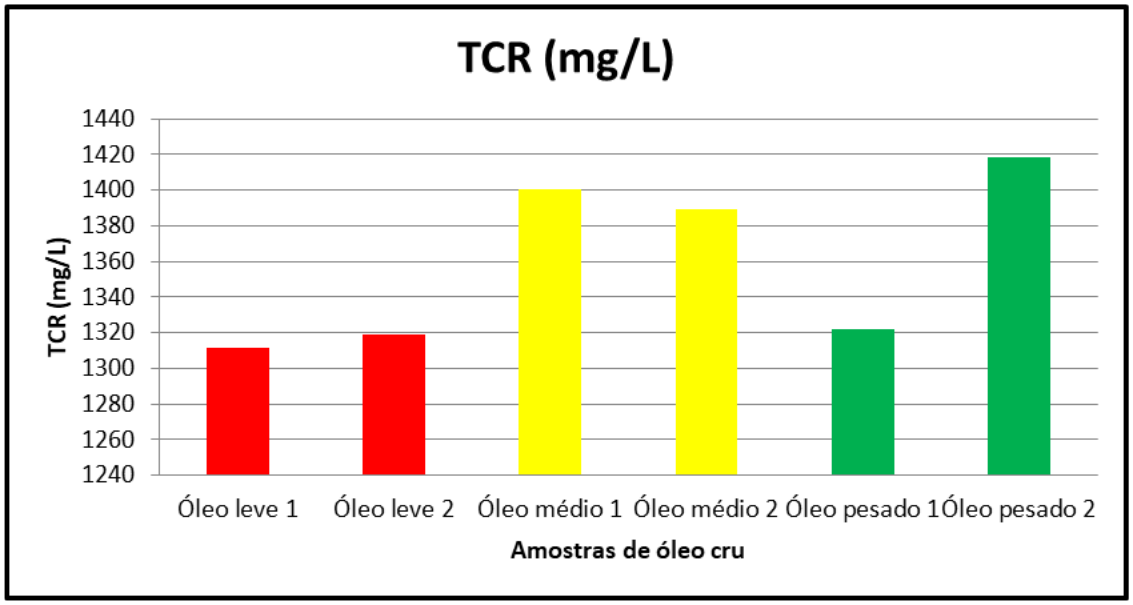
Fonte: Próprio autor (2016).

Após o processo de redissolução os extratos de óleo foram utilizados para a determinação do TCR.

Determinação do teor de carbono residual

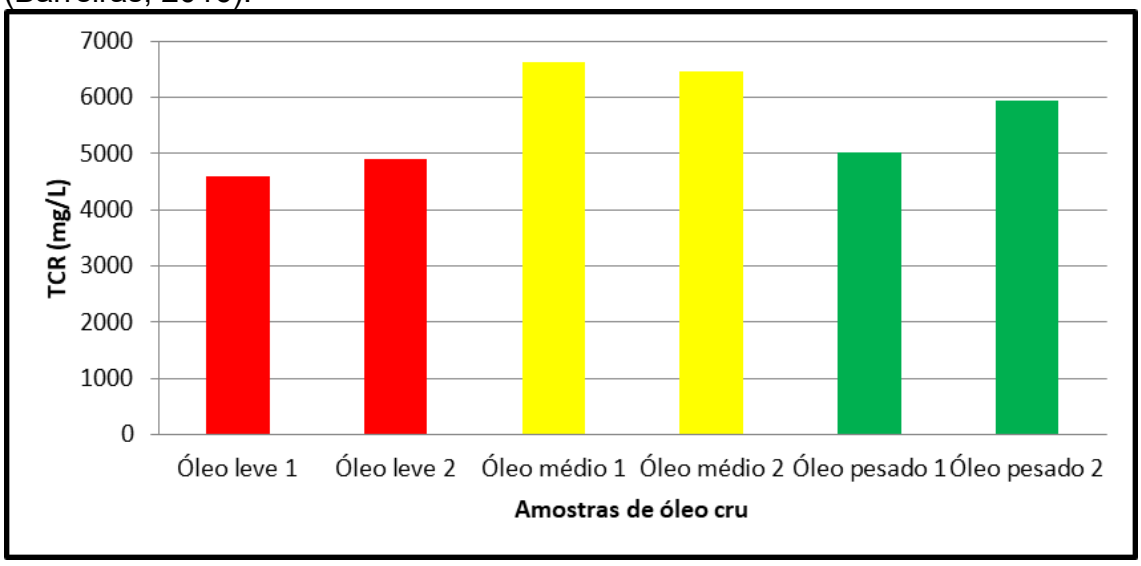
A avaliação da eficiência da decomposição das amostras de óleo foi realizada através da determinação do TCR em mg/L. As determinações foram realizadas com o uso do TOC, utilizando uma curva de calibração externa, que foi preparada utilizando padrão de biftalato de potássio com concentração máxima de 1000 $mg.L^{-1}$. Desta forma, para a realização das análises, as amostras tiveram que ser diluídas. Os resultados obtidos são mostrados nas figuras 4, 5, 6, 7 e 8 para os diferentes tipos de óleo e programações.

Figura 4. Resultados de TCR no primeiro experimento com digestão de 100 mg de amostra (tabela 1) (Barreiras, 2016).



Fonte: Próprio autor (2016).

Figura 5. Resultado do TCR em 250 mg de amostras digeridas após a redissolução em 10 mL de HNO_3 2% com o uso da programação da tabela 2 (Barreiras, 2016).

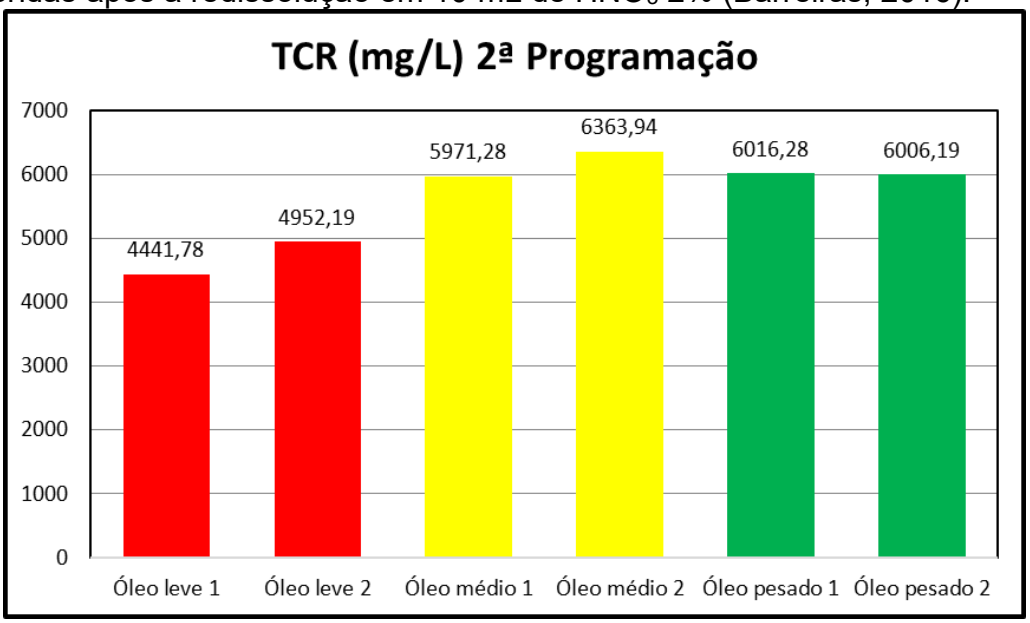


Fonte: Próprio autor (2016).

Os resultados apresentados nas figuras, levando em consideração o volume final de 10 mL, mostraram-se eficientes com teores de carbono residual abaixo de 30%. Para a figura 7, por exemplo, com massa de amostra 100 mg, observa-se que os óleos com menor °API apresentaram maior RCC. O mesmo não foi observado com o aumento da massa das amostras com o óleo médio apresentando maior teor de RCC. Com o aumento do tempo de decomposição

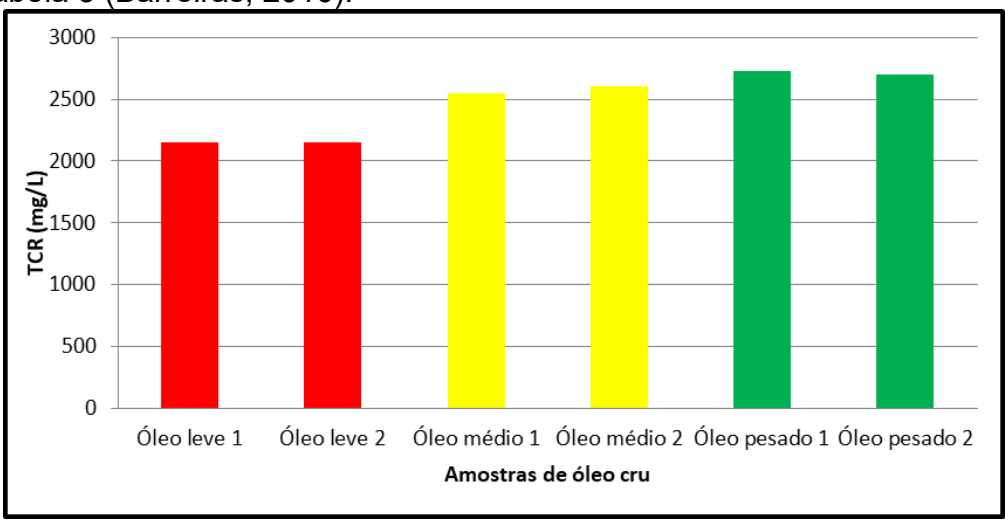
da amostra (2ª Programação) não obteve diferença significativa quanto ao teor de carbono residual. Nesta programação, também o óleo médio obteve maior RCC nos extratos.

Figura 6. Concentração do carbono residual presente em 250 mg de amostras digeridas após a redissolução em 10 mL de HNO_3 2% (Barreiras, 2016).



Fonte: Próprio autor (2016).

Figura 7. Concentração do carbono residual presente em 100 mg de amostras digeridas após a redissolução em 10 mL de HNO_3 2% com o uso da programação da tabela 3 (Barreiras, 2016).



Fonte: Próprio autor (2016).

O RCC, obtido para a realização das análises, nesses procedimentos estão acima dos valores obtidos por vários pesquisadores (Wang *et al.*, 2003;

Bressani *et al.*, 2006; Sneddon *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2010, 2013, 2014; Mello *et al.*, 2012; Amais *et al.*, 2013; Costa *et al.*, 2005; Druzian *et al.*, 2016). Porém, esta diferença é justificada, comparando as mesmas condições, pelo fato que os mesmos realizam a diluição das amostras após a programação da decomposição, obtendo menores valores de resíduo de carbono nos extratos (Druzian *et al.*, 2016). A diluição é uma alternativa para evitar problemas espectrais nas técnicas de ICP, porém, como trata-se de elementos em baixas concentrações, a redissolução em 10 mL de HNO_3 2 %(v/v) favorece para concentrar os elementos na amostra e reduzir a acidez residual nos extratos.

A eficiência da decomposição da matéria orgânica (EDMO, %) foi calculada para avaliar a qualidade do processo de digestão com o uso equação 1 (Castro *et al.*, 2009).

Equação 1

$$EDMO = \frac{TCC - RCC}{TCC} \; x \; 100$$

Esta equação relaciona o teor de carbono total (TCC) contida no óleo bruto com o teor de carbono residual (RCC) após a digestão. A resposta da EDMO encontra-se na tabela 6.

Tabela 6. Eficiência da digestão das amostras de óleo nas três programações (Barreiras, 2016).

Amostras	EDMO (%)			
	1ª Programação (100 mg)	3ª Programação 1 (100 mg)	2ª Programação 1 (250 mg)	3ª Programação 2 (250 mg)
Óleo leve 1	87,1	79,8	81,8	82,4
Óleo leve 2	87,3	79,2	81,0	80,4
Óleo médio 1	86,9	76,0	73,9	76,1
Óleo médio 2	86,4	74,8	74,7	75,3
Óleo pesado 1	87,4	74,4	81,2	78,2
Óleo pesado 2	86,0	74,4	76,9	76,4

Fonte: Próprio autor (2016).

Os resultados apresentados na tabela 6, mostram uma boa eficiência da digestão da matéria orgânica, possuindo uma variação estreita entre os diferentes tipos de óleo e programações. Estes resultados foram semelhantes ao máximo de eficiência de digestão obtido por Silva (2012).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos mostram que para a quantificação de elementos químicos em óleo cru, por meio de técnicas analíticas, necessita-se do preparo da amostra para tornar o analito disponível para a sua determinação. No procedimento realizado, observa-se que esta etapa precisa ser avaliada para melhor obtenção da eficiência da digestão e posteriormente a realização da determinação elementar. Para o procedimento, o uso do forno de micro-ondas tem sido a melhor opção com a vantagem de redução do tempo de preparo da amostra e minimização dos erros com perda de elementos voláteis e contaminação, que foi evidenciado pelos resultados obtidos para o baixo teor de carbono residual das amostras. Ainda assim outros parâmetros devem ser avaliados no processo de digestão, como a acidez residual, que também pode comprometer a realização análises por meio do uso de técnicas espectroscópicas. Com isso, o presente trabalho tem como perspectiva a determinação da acidez residual e a quantificação de metais, a partir do estabelecimento do protocolo para essa metodologia analítica.

REFERÊNCIAS

AKINLUA, A., OLISE, F.S., AKOMOLAFE, A.O., MCCRINDLE, R.I. Rare earth element geochemistry of petroleum source rocks from northwestern Niger Delta. Mar. **Pet. Geol.** v. 77, p. 409–417, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.06.023.

AMAIS, R.S., DONATI, G.L., SCHIAVO, D., NÓBREGA, J.A. A simple dilute-and-shoot procedure for Si determination in diesel and biodiesel by microwave-induced plasma optical emission spectrometry. **Microchem. J.,** v. 106, p. 318–322 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.09.001.

BRESSANI, F.A., SILVA, H.O., QUÍMICA, D. DE, FEDERAL, U., CARLOS, D.S., SP, S.C., COSTA, L.M., NOGUEIRA, A.R.A., SUDESTE, E.P., Sp, S.C. Digestão de óleo lubrificante encapsulado em forno de microondas com radiação focalizada por adição de amostra ao reagente pré-aquecido, **Química Nova**, v. 29, n. 6, p. 1210–1214, 2006. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000600012.

CASTRO, J.T., SANTOS, E.C., SANTOS, W.P.C., COSTA, L.M., KORN, M., NÓBREGA, J.A., KORN, M.G.A. A critical evaluation of digestion procedures for coffee samples using diluted nitric acid in closed vessels for inductively coupled

plasma optical emission spectrometry. **Talanta** 78, 1378–1382, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.02.030.

CAVALCANTE, D. da C.; BASTOS, L. P. Heckert; PEREIRA, E. Caracterização geoquímica e isotópica de óleos de bacias brasileiras. **Geologia USP. Série Científica**, São Paulo, Brasil, v. 22, n. 3, p. 85–102, 2022. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v22-188786.

CARVALHO, P. S. da S. Caracterização de frações segregadas de catalisadores de equilíbrio de FCC por microscopia eletrônica de varredura e de transmissão. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-pemm_upl/THESIS/10003198/2022_msc_pemm_paulo_sergio_da_silva_carvalho__carvalhops_carvalhops_2022052915161059.pdf. Acesso em: 01 out. 2025.

COSTA, L.M., FERREIRA, I.S.L.C., RITA, I.A., Ii, A.N. Use of factorial design for optimization of microwave - assisted digestion of lubricating oil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**,v. 16, p. 1269–1274, 2005. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-50532005000700027.

DRUZIAN, G.T., PEREIRA, L.S.F., MELLO, P.A., MESKO, M.F., DUARTE, F.A., FLORES, E.M.M. Rare earth element determination in heavy crude oil by USN-ICP-MS after digestion using a microwave-assisted single reaction chamber. **J. Anal. At. Spectrom.** v. 31, n. 6, p. 1185–1191, 2016. DOI: https://doi.org/10.1039/C6JA00050A.

DUYCK, C., MIEKELEY, N., P. DA S., C.L., AUC??LIO, R.Q., CAMPOS, R.C., GRINBERG, P., BRANDO, G.P. The determination of trace elements in crude oil and its heavy fractions by atomic spectrometry. **Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.** v. 62, n. 9, p. 939–951, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sab.2007.04.013.

EVANS, C.R., ROGERS, M.A., BAILEY, N.J.L. Evolution and alteration of petroleum in western Canada. **Chem. Geol.** v. 8, n. 3, p. 147–170, 1971. DOI: https://doi.org/10.1016/0009-2541(71)90002-7. Acesso em: 01 out. 2025.

FONTANA, K. B. Estratégias analíticas para quantificação de elementos terras raras e avaliação de risco ambiental em cascalho de perfuração de poços de petróleo. **Tese** (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Programa de Pós-Graduação em Química, Florianópolis, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/249973/PQMC1075-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 01 out. 2025.

GOMES, M. L. C. O parâmetro de solubilidade de Hildebrand do propano aplicado as operações de desasfaltação no refino de petróleo. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia de Petróleo). Universidade

Federal de Pelotas, 2022. Disponível em: https://pergamum.ufpel.edu.br/pergamumweb/vinculos/0000e7/0000e7ce.pdf. Acesso em: 01 out. 2025.

LICHT, O.A.B. **Prospecção geoquímica: princípios, técnicas e métodos** / Otávio Augusto Boni Licht. - Rio de Janeiro: CPRM, 1998.

LIMA, P. V. A avalição da viabilidade técnica do uso de óleos vegetais em óleos lubrificantes de alto desempenho. Rio de Janeiro. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2025. Disponível em: https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/27345/1/PVLima.pdf. Acesso em: 01 out. 2025.

MELLO, P.A., PEREIRA, J.S.F., MESKO, M.F., BARIN, J.S., FLORES, E.M.M. Analytica Chimica Acta Sample preparation methods for subsequent determination of metals and non-metals in crude oil — A review. **Anal. Chim. Acta,** v.746, p. 15–36, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.08.009.

MONTEIRO, G. DE F.; DO EGITO, E. M. N. Importância da Fase Pré–Analítica e seus Impactos nos Exames Laboratoriais. **Brazilian Journal of Biological Sciences**, v. 11, n. 25, p. e100-e100, 2024. DOI: https://doi.org/10.21472/bjbs.v11n25-030.

PEDROZO, M.D.F.M., BARBOSA, E.M., CORSEUIL, H.X., SCHNEIDER, M.R., LINHARES, M. M.. **Ecotoxicologia e avaliação de risco do petróleo**. – Salvador: Centro de Recursos Ambientais, v. 12, 2002.

PEREIRA, J.S.F., MORAES, D.P., ANTES, F.G., DIEHL, L.O., SANTOS, M.F.P., GUIMARÃES, R.C.L., FONSECA, T.C.O., DRESSLER, V.L., Flores, É.M.M. Determination of metals and metalloids in light and heavy crude oil by ICP-MS after digestion by microwave-induced combustion. **Microchem. J.** v. 96, n. 1, p 4–11, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.12.016.

PEREIRA, J.S.F., PEREIRA, L.S.F., MELLO, P.A., GUIMARÃES, R.C.L., GUARNIERI, R.A., FONSECA, T.C.O., FLORES, E.M.M. Microwave-induced combustion of crude oil for further rare earth elements determination by USN-ICP-MS. **Anal. Chim. Acta,** v. 844, p. 8–14, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.07.043.

PEREIRA, J.S.F., PICOLOTO, R.S., PEREIRA, L.S.F., GUARNIERi, R.A., Flores, E.M.M. High-efficiency microwave-assisted digestion combined to in situ ultraviolet radiation for the determination of rare earth elements by ultrasonic nebulization ICPMS in crude oils. **Analytical chemistry**, v. 85, n. 22, p. 11034-11040, 2013. DOI: https://doi.org/10.1021/ac402928u.

PRAUCHNER, M. J.; BRANDÃO, R. D.; FREITAS JUNIOR, A. M.; OLIVEIRA, S. da C. Combustíveis Derivados do Petróleo: Obtenção, Propriedades e Usos. **Rev. Virtual Quim.** v. 15, n.1, p. 43-60, 2022. Disponível em: https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/4369/1016. Acesso em: 13 out. 2025

SANTOS, I. G. A.; WISNIEWSKI JUNIOR, A. Sequestrantes de Compostos de

Enxofre para Petróleo. **Rev. Virtual Quim.**, v. 15, n.3, p. 553-566, 2023. Disponível em: https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/4484/1055. Acesso em: 14 out. 2025.

SILVA, I. K. V. Petróleo por digestão ácida auxiliada por microondas para a determinação de metais por ICP OES. **Dissertação de Mestrado.** Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 62 p., 2012. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/2c444c6a-906e-4332-a682-d2ce8cb9c908/content. Acesso em: 11 out. 2025.

SNEDDON, J., HARDAWAY, C., BOBBADI, K.K., BECK, J.N. A study of a crude oil spill site for selected metal concentrations remediated by a controlled burning in Southwest Louisiana. **Microchem. J.,** v. 82, n. 1, p. 8–16, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microc.2005.06.006.

SOUZA, R.M. de. Desenvolvimento de métodos analíticos para determinação de elementos traço em amostras oleosas e pastosas por ICP OES e ICP- MS. **Tese** (Doutorado em Química). Programa de Pós-graduação em Química, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: https://www.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0310282_07_pretextual.pdf. Acesso em: 01 out. 2025

SOUZA, V. E. de O. Dano ambiental causado por materiais particulados pelo uso de combustíveis fósseis. **Revista Insigne de Humanidades**, *[S. l.]*, v. 1, n. 1, p. 18–38, 2024. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.12519074.

WANG, T., Jia, X., WU, J. Direct determination of metals in organics by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry in aqueous matrices. **J. Pharm. Biomed. Anal.**, v. 33, n. 4, p. 639–646, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0731-7085(03)00357-1.