

Correlação entre a composição química e mineralógica e as características plásticas de folhelhos do Nordeste do Brasil

T. G. Apolônio^{1*}, L. V. Amorim², C. A. Leal³

¹Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande – PB, CEP 58429-000

²Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia de Petróleo, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande – PB, CEP 58429-000

³Universidade Federal de Campina Grande, Laboratório de Pesquisa em Fluidos de Perfuração, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande – PB, CEP 58429-000

*tulioalvaop@gmail.com

(Recebido em 01/10/2020; revisado em 13/11/2020; aceito em 14/11/2020)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

O objetivo deste trabalho foi caracterizar amostras de folhelhos do Nordeste do Brasil e correlacionar a sua composição química e mineralógica com a sua plasticidade. Para isso, três amostras de folhelhos foram caracterizadas por fluorescência de raios x (FRX), difração de raios x (DRX), análise granulométrica (AG), termogravimetria (TGA) e tiveram suas plasticidades mensuradas a partir da determinação dos índices de Atterberg. Os resultados demonstraram que a composição mineralógica dos folhelhos foi o fator determinante para a plasticidade, e que a predominância de argilominerais esmectíticos e ilíticos promove um maior índice de plasticidade (IP), o que, provavelmente, pode ocasionar problemas de acreção de cascalhos nos componentes de fundo da coluna de perfuração com moderada intensidade durante as operações de perfuração de poços de petróleo.

Palavras-chave: Caracterização; argilomineral; plasticidade; Atterberg; acreção

Abstract:

This work aimed to characterize shales samples from Northeast Brazil and to correlate their chemical and mineralogical composition with their plasticity. Three samples of shales were characterized by x-ray fluorescence (XRF), x-ray diffraction (XRD), granulometric analysis (GA), thermogravimetry (TG) and their plasticity was measured from the determination of Atterberg indexes. The results showed that the mineralogical composition of the shales was the determining factor for plasticity and the predominance of smectitic and illitic clay minerals promotes a higher index of plasticity (IP), which, probably, can cause agglomeration and accretion of drill cuttings in the bottom hole assembly components with average scale.

Keywords: Characterization; clay minerals; plasticity; Atterberg; accretion.

1. Introdução

A perfuração de poços é uma das etapas mais complexas da indústria petrolífera, sobretudo, quando se perfuram folhelhos, que são rochas de estruturas dentrificadas formadas a partir da deposição de sedimentos através de uma série de processos químicos e físicos. Essas rochas são constituídas de estruturas lamelares ricas em elementos de fina granulometria que se enquadram na fração argila e silte, e sua composição química é função de minerais de argila (esmectita, caulinita, illita, etc) e minerais acessórios (quartzo, carbonatos, feldspatos, etc) [1,2]. De acordo com Asef e Farrokhrouz [3], os folhelhos representam 55% de todas as rochas sedimentares e, geralmente, possuem um conteúdo argiloso superior a 40%. A complexidade associada à perfuração de folhelhos está relacionada com

interações mecânicas e físico-químicas entre os fluidos de perfuração e a formação, uma vez que essas rochas são formadas por argilominerais com tendência aos fenômenos de inchamento, desintegração e acreção [4].

Estudos têm sido reportados na tentativa de explicar os fenômenos que causam as instabilidades de folhelhos, principalmente os fenômenos de inchamento e desintegração [5,6,7,8]. Os resultados demonstram que o fator principal para a instabilidade está relacionado com a presença de argilominerais reativos, como a esmectita, e também de argilominerais considerados não reativos, como a illita e a caulinita. No entanto, pouco se sabe sobre os mecanismos que afetam o fenômeno de acreção.

De acordo com Gholami et al. [4], o fenômeno de acreção corresponde à adesão de cascalhos ao redor do BHA, do inglês Bottom Hole Assembly, ou seja, os

componentes de fundo de poço, e se desenvolve quando a taxa de hidratação dos folhelhos é suficientemente alta para atingir o seu limite plástico, promovendo um estado de plasticidade.

Segundo Van Oort et al. [9], os efeitos da acreção de cascalhos são mais pronunciados em folhelhos plásticos com elevado teor de argila. Estudos de Van Oort [1] e de Jadoon et al. [10] mencionam que a plasticidade do folhelho é influenciada, primordialmente, pelo tipo e teor de argilominerais presentes, e a magnitude dessa propriedade dependerá do grau de hidratação/desidratação e da pressão de inchamento da formação, assim como do seu teor de finos e do seu conteúdo de matéria orgânica. Os autores constataram que existe uma ampla correlação da composição mineral de um folhelho com o seu comportamento plástico. Cliffe e Young [11] observaram que folhelhos com elevado teor dos argilominerais illita e caulinita serão mais suscetíveis ao fenômeno de acreção quando expostos a fluidos de perfuração aquosos. Por outro lado, folhelhos que possuem maior teor de minerais interestificados illita-smectita tendem a ser mais hidratáveis e apresentam maior acreção.

Desse modo, é possível afirmar que problemas de acreção de cascalhos no BHA estão relacionados com o grau de plasticidade dos folhelhos, que por sua vez é intimamente dependente da composição química e mineralógica dessas formações. Problemas com encerramento de componentes de fundo de poço reduzem a taxa de penetração e aumentam o tempo de sonda não produtiva, gerando despesas significativas para a indústria do petróleo [11,12,13].

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi caracterizar amostras de folhelhos do Nordeste do Brasil e correlacionar a sua composição química e mineralógica com as suas características plásticas.

2. Materiais e Métodos

Materiais: para a realização deste estudo foram selecionadas três amostras de folhelhos oriundas de bacias sedimentares do Nordeste do Brasil. As amostras foram denominadas de FOL1, FOL2 e FOL3, sendo as amostras FOL1 e FOL3 provenientes da Bacia Rio do Peixe, localizada no município de Sousa – PB, situada na coordenada 6°44'58,88"S 38°14'50,79"O e a amostra FOL2 proveniente da Bacia do Araripe, localizada no município de Nova Olinda – CE, situada na coordenada 7° 05'11"S 38° 31'17"O.

Metodologia: as amostras de folhelhos, inicialmente na forma de fragmentos rochosos, foram beneficiadas utilizando almofariz e peneira ABNT Nº 200. A seguir, foram encaminhadas para os ensaios de caracterização física, química, mineralógica e térmica. A composição química foi determinada por fluorescência de raios X (FRX) a partir do método semiquantitativo, sob atmosfera de nitrogênio, no espectrômetro de fluorescência modelo EDX-720 da marca SHIMADZU. Para a determinação qualitativa dos constituintes

mineralógicos dos folhelhos, utilizou-se da técnica de difração de raios X, realizada no difratômetro de raios X Shimadzu modelo XRD-6000, operando com radiação $K\alpha$ de cobre a 40 kV, 30 mA de corrente, comprimento de onda de $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$. As amostras foram ensaiadas numa variação 2θ entre $3^\circ - 70^\circ$, com taxa do goniômetro de $2^\circ/\text{min}$. As fases cristalinas foram identificadas de acordo com as seguintes cartas do arquivo ICDD (International Centre for Diffraction Data): 12-0219 - esmectita; 43-0685 - illita; 78-2109 - caulinita; 05-0586 - calcita; 89-8575 - feldspato; e 46-1045 - quartzo.

As curvas termogravimétricas foram obtidas a partir do equipamento da marca Shimadzu Scientific Instruments, modelo DTG-60H. Os ensaios foram realizados com temperatura variando de 25 a 1000°C , com razão de aquecimento de $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, e fluxo de gás de nitrogênio de 100 mL/min. A massa estudada foi de aproximadamente 10mg.

A análise granulométrica por difração a laser permitiu analisar a distribuição do tamanho de partículas nas amostras de folhelhos. Uma dispersão foi preparada com 5g de amostra de folhelho e 250mL de água destilada e sem seguida agitada em um agitador da marca Hamilton Beach, modelo N5000, a uma velocidade de 17.000rpm por 10min. Por fim, as dispersões foram colocadas no granulômetro CILAS modelo 1064, via úmido, até que se atingisse uma concentração ideal difração/área de incidência de 150 unidades.

A plasticidade dos folhelhos foi mensurada de acordo com os Índices de Atterberg, pelo método de Casagrande. Os índices de Atterberg fornecem uma avaliação do estado de consistência dos solos (sólido, semi-sólido, plástico e líquido) a partir das medidas dos limites de liquidez (LL) e dos limites de plasticidade (LP), em função do volume e do teor de umidade. As amostras foram preparadas seguindo a norma ABNT 6457 [14]. O limite de liquidez foi determinado de acordo com a norma ABNT 6459 [15] e o limite de plasticidade, de acordo com a norma ABNT 7180 [16]. A partir do conhecimento dos limites de liquidez e dos limites plásticos, foram determinados os índices de plasticidade (IP) por meio da Equação (A).

$$IP=(LL-LP)\times 100\% \quad (1)$$

Onde:

IP = Índice de Plasticidade;

LL = Limite de Liquidez;

LP = Limite Plástico.

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados da fluorescência de raios X, responsável por fornecer a proporção dos principais óxidos em um dado material, possibilitando uma melhor compreensão do caráter mineralógico e das propriedades dos folhelhos estudados.

Tabela 1 – Análise química dos constituintes das amostras de folhelhos estudadas.

Composição Química

Amostras	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SO ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
FOL1	60,82	19,54	8,99	2,39	2,70	3,55	1,00	0,55	0,15	0,23	3,11
FOL2	39,86	14,87	7,57	22,80	5,42	3,55	0,89	-	0,11	4,75	2,68
FOL3	53,87	20,54	10,44	3,98	3,65	3,72	1,05	0,14	0,12	0,12	2,62

As amostras de folhelhos apresentaram elevados teores dos óxidos de silício, variando de 39,86 a 60,82%, e de alumínio, variando de 14,87 a 20,14%. Esses valores indicam a presença de argilominerais e minerais acessórios [17]. Como visto na Tabela 1, a relação de massa entre SiO₂/Al₂O₃ para todas as amostras é mais alta que as encontradas para amostras com elevada pureza de caulinita (SiO₂/Al₂O₃ = 1,18) e montmorilonita (SiO₂/Al₂O₃ = 2,36), o que é indicativo da presença do mineral quartzo de acordo com Silva et al. [18]. As amostras de folhelhos também apresentaram apreciáveis teores de óxido de ferro, o que pode estar atrelado a coloração das amostras. Quanto maior a concentração de Fe₂O₃, mais avermelhada será a amostra. Além disso, o óxido de ferro pode indicar a presença de argilominerais como a illita e/ou a esmectita. Verificou-se nas amostras teores de óxido de cálcio variando de 2,39 a 20,80%, o que sugere a presença de carbonatos. As amostras de folhelhos apresentaram

também o óxido de potássio com teores variando de 2,70 a 5,42 %. Estudos de Mkaouar et al. [18] apontaram a presença de K₂O numa faixa de 2,53 a 6,38% como indicativo de argilominerais do grupo da illita. Dentre as amostras estudadas, a FOL2 foi a única a apresentar teor considerável (4,75%) de óxido de enxofre. Segundo Suguio [19], elevados teores de óxido de enxofre indicam a presença de matéria orgânica. Todas as amostras desse estudo apresentaram teores de óxido de magnésio variando de 3,55 a 3,72%. De acordo com Motta et al. [20], elevados percentuais de óxido de silício, associados a teores apreciáveis de MgO, pode ser indicativo do argilomineral esmectita.

Na Figura 1 estão exibidos os difratogramas de raios X das amostras de folhelhos estudadas. Foi possível identificar picos referentes à presença de argilominerais e minerais acessórios, demonstrando o que havia sido estimado pela fluorescência de raios X.

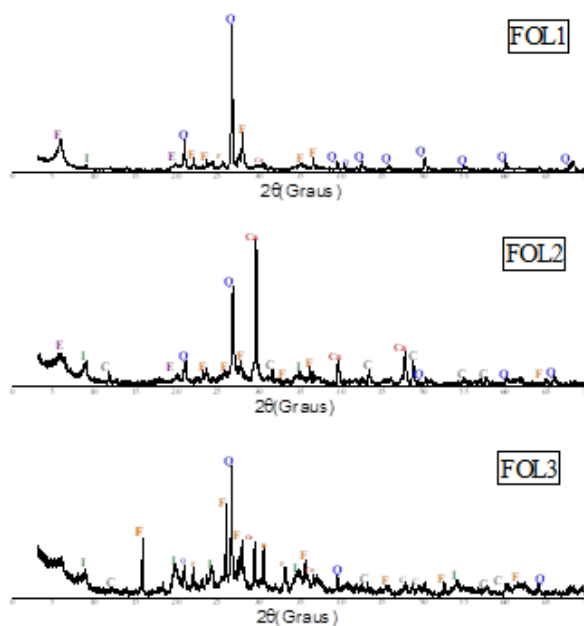


Figura 1 – Difratogramas de raios X para as amostras FOL1, FOL2 e FOL3, sendo: E – Esmectita, I - Illita, C - Caulinita, F - Feldspato, Q - Quartzo, Ca – Calcita.

O argilomineral caulinita foi observado nas amostras FOL2 e FOL3. A presença de caulinita está atribuída aos teores de óxidos de silício e alumínio, uma vez que a composição mineralógica desse argilomineral é basicamente formada por silicatos de alumínio. Para as amostras de folhelhos em estudo, foram verificados picos referentes ao argilomineral illita. A presença da illita é fortemente representada pela presença de óxido de potássio em sua composição química e, de acordo com a fluorescência de raios X (Tabela 1), todas as amostras em estudo apresentaram teores de óxido de potássio variando de 2,70 a 5,42%.

Nas amostras FOL1 e FOL2 foram observados picos referentes ao argilomineral esmectita. A presença de esmectita é compatível como os elevados teores de silicatos e aluminatos vistos nas composições químicas da Tabela 1. Também foram identificados picos de

quartzo e de feldspato, o que era esperado devido à sílica livre e pela presença de óxidos fundentes, respectivamente, na composição química dos folhelhos. Além disto, picos referentes a calcita foram observados em todas as amostras, confirmando a presença de carbonatos, especialmente na amostra de folhelho FOL2.

A Figura 2 exibe curvas termogravimétricas das amostras de folhelhos desse estudo. O primeiro pico endotérmico ocorre em temperaturas de aproximadamente 150 °C e foi verificado para as três amostras. Esse evento está atribuído a eliminação da umidade presente e a perda de água adsorvida. O segundo evento endotérmico ocorre entre uma faixa de temperatura aproximadamente 200 e 550 °C para as três amostras de folhelhos, devendo-se a combustão de matéria orgânica por reações de desidroxilação.

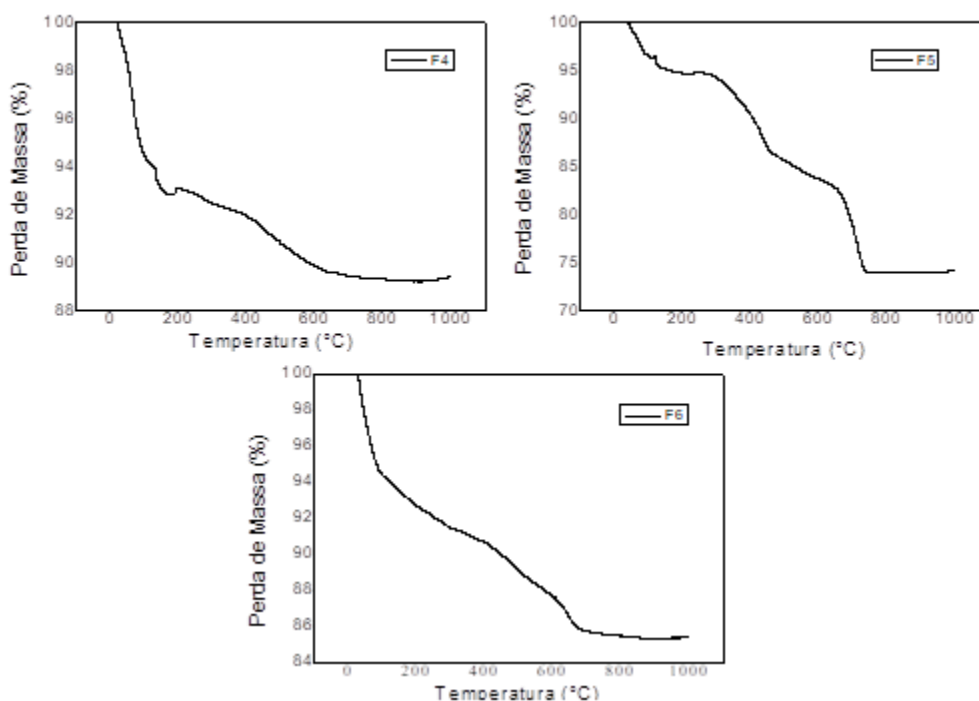


Figura 2 - Curvas TGA das amostras FOL1, FOL2 e FOL3 obtida a razão de aquecimento de 10°C/min em atmosfera de N₂.

A amostra de folhelho FOL2 foi a única a apresentar um terceiro pico endotérmico mais evidente em aproximadamente 720 °C, referente a decomposição de carbonatos, os quais foram quantificados pela fluorescência de raios X em uma maior proporção para essa amostra (22,5%). De acordo com Mkaouar [18], os materiais argilosos apresentam reações endotérmicas e exotérmicas que são responsáveis pela perda de massa em forma de água, combustão de matéria orgânica e decomposição de carbonatos. Dessa forma é possível inferir que parte da massa perdida está associada a combustão de matéria orgânica presente nas amostras de folhelhos, e como mencionando por Menezes et al. [21], sabe-se que a plasticidade também é função do teor de matéria orgânica. A presença de matéria orgânica em um

folhelho também se caracteriza como um fator que contribui para a retenção de água, pois a estrutura aberta dos componentes orgânicos tem a capacidade de reter cátions trocáveis e moléculas de água, o que por sua vez aumenta a plasticidade [10].

As perdas de massas para as amostras de folhelhos estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Percentuais de massa perdida para as amostras de folhelhos analisadas por TGA.

Análise Termogravimétrica	
Amostra	Perda de Massa (%)
FOL1	10,6
FOL2	25,9
FOL3	14,6

A amostra de folhelho FOL2 apresentou a maior (25,8%) perda de massa nesse estudo, o que provavelmente está relacionado com a volatilização de moléculas de H₂O e de CO₂ proveniente de carbonatos e da matéria orgânica presente [18]. Além disso, a amostra FOL2 apresentou maior percentual de óxido de enxofre o que está associado a presença de matéria orgânica [8].

Verificando as curvas de distribuição granulométrica apresentadas na Figura 3, percebe-se que todas as amostras de folhelhos apresentaram comportamento multimodal em diferentes faixas granulométricas, as quais compreendem partículas que se enquadram na granulometria da fração argila, silte e areia.

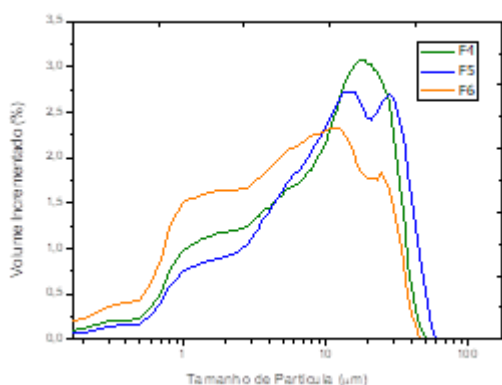


Figura 3 - Curvas de distribuição do tamanho de partícula das amostras.

Na Tabela 3 é possível observar que, para as amostras de folhelhos desse estudo, os maiores percentuais são de partículas que se enquadram nas frações argila (15,81 a 30,26%) e silte (57,06 a 59,74%). Em geral, quanto maior o percentual de partículas que se enquadra na granulometria de argila (<2 µm) e silte (>2<20 µm), maior será a retenção de líquidos e substâncias polares, pois quanto menor o tamanho de partícula, maior será a área superficial, logo, as características plásticas das amostras de folhelhos serão fortemente afetadas por essa capacidade de retenção de água [10].

Tabela 3 - Percentuais de partículas enquadradas na fração argila, silte e areia das amostras de folhelhos FOL1, FOL2 e FOL3.

Granulometria Das Frações			
Amostra	Argila (<2 µm) (%)	Silte (>2<20 µm) (%)	Areia (<20 µm) (%)
FOL1	20,33	59,74	19,93
FOL2	15,81	58,83	25,36
FOL3	30,26	57,06	12,68

Os gráficos da Figura 4 relacionam os níveis de umidade dos folhelhos com o número de golpes para a determinação do Limite de Liquidez (LL). Os pontos em destaque correspondem ao LL e foram obtidos a partir da linearização dos demais pontos, de acordo com a Equação 3. As amostras FOL1 e FOL2 apresentaram os maiores valores de LL (48 e 50% respectivamente), o que está relacionado à presença de minerais argilosos em suas composições.

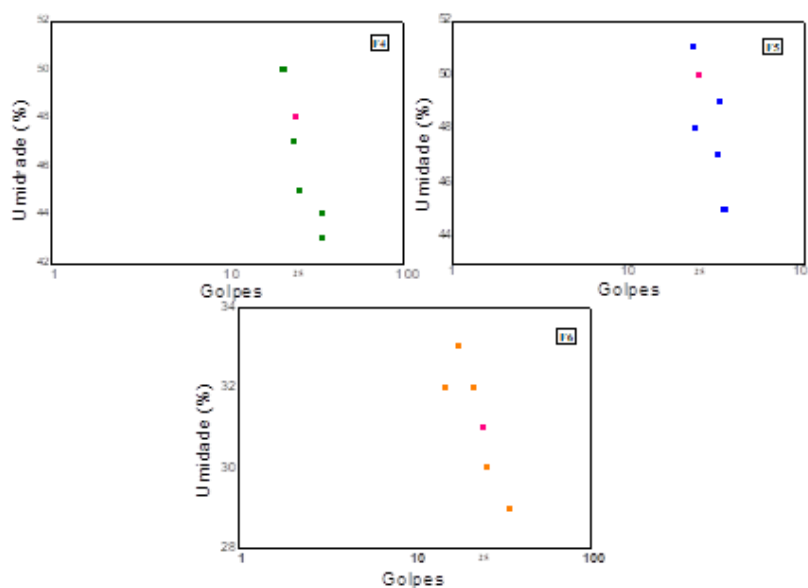


Figura 4 – Gráficos do teor de umidade das amostras FOL1, FOL2 e FOL3, onde os pontos em destaque representam o limite de liquidez.

Além do LL, o limite de plasticidade (LP) é um importante índice para mensurar a plasticidade dos folhelhos. O LP é o teor de umidade abaixo do qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido, ou seja, perde a capacidade de ser plástico e se torna quebradiço [22]. A partir da diferença entre LL e LP

obtem-se o índice de plasticidade, que se refere à faixa de umidade que um solo é considerado plástico. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para os índices de Atterberg das amostras estudadas, bem como a classificação, proposta por Maestrelli et al. [23], quanto ao grau de plasticidade.

Tabela 4 - Índices de Atterberg das amostras FOL1, FOL2 e FOL3 e classificação quanto ao grau de plasticidade.

Índices De Atterberg				
Amostra	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Grau de Plasticidade
FOL1	48	39	9	Moderadamente plástico
FOL2	50	40	10	Moderadamente plástico
FOL3	31	26	5	Fracamente plástico

De acordo com os resultados da Tabela 4, as amostras de folhelhos FOL1 e FOL2 apresentaram os maiores índices de plasticidade (9 e 10%, respectivamente). As amostras apresentaram picos referentes ao argilomineral esmectítico, que são considerados bastante plásticos. As esmectitas destacam-se por suas propriedades particulares como o inchamento, propriedades reológicas e coloidais e, principalmente, por sua elevada capacidade de troca catiônica, a qual é proveniente de substituições isomórficas que ocorrem nas folhas tetraédricas e octaédricas desse argilomineral. Essas substituições favorecem a hidratação e o inchamento devido a tendência de adsorção de íons hidratados, implicando no aumento da plasticidade em folhelhos que possuem esse argilomineral [18, 24].

As amostras com maiores índices de plasticidade também apresentaram picos referentes ao argilomineral illita, o que está de acordo com os estudos de Cliffe e Young [11] e de Campos et al. [25], que afirmam que folhelhos que possuem illita e impurezas de esmectitas, geralmente, demonstram elevada plasticidade. Observando os difratogramas de raios X da amostra de folhelho FOL2 (Figura 1), verificou-se a presença da caulinita. O argilomineral caulinita desenvolve plasticidade quando em contato com água e é caracterizado por possuir elevada área específica e alto teor de matéria orgânica. Porém, ao comparar os difratogramas das amostras de folhelhos FOL1 e FOL2, percebeu-se que a amostra de folhelho FOL1 não apresentou picos referentes ao argilomineral caulínítico, e ainda assim obteve índice de plasticidade de 9%. Essa comparação sugere que a caulinita, apesar de suas características plásticas intrínsecas, seria o último argilomineral a interferir na plasticidade do folhelho. White [26] estudou os índices de Atterberg para amostras de solos contendo a predominância dos argilominerais esmectíticos, ilíticos e caulíníticos com elevada pureza e observou que o índice de plasticidade dos argilominerais é função dos argilominerais dominantes. O autor observou que o índice de plasticidade dos argilominerais decresce na seguinte ordem: Esmectita > Illita > Caulinita.

Na amostra FOL3 foi observado o menor índice de plasticidade (5%) dentre as amostras de estudadas. Pelo

difratograma de raios X, essa amostra apresentou os argilominerais illita e caulinita, logo, o menor IP está associado à presença da caulinita, pois como visto por Vieira et al. [27], a illita apresenta maior plasticidade que a caulinita. Além disso, a ausência de argilominerais mais plásticos, como a esmectita, a presença de minerais não argilosos, como o quartzo e feldspato, e o menor limite de liquidez (31%) dentre as amostras estudadas, contribuem como redutores de plasticidade [28, 29].

De acordo com Van Oort [1] e Cliffe e Young [11], folhelhos que forem expostos a estados de plasticidade podem ocasionar problemas de aglomeração e acreção de cascalhos na coluna de perfuração e de enceramento de broca. Os resultados apresentados nessa discussão corroboram com os estudos de Jadoon et al. [10], que estudou a plasticidade de folhelhos de diversas regiões. O autor fez uma comparação básica entre folhelhos de composição mineralógica heterogênea e constatou que folhelhos de mesma composição, diferindo apenas na presença de esmectita, apresentaram grau de plasticidade inferior, enquanto que os folhelhos que apresentaram apenas traços do argilomineral esmectítico, demonstraram índice de plasticidade superior. Desse modo, é possível inferir que a magnitude do fenômeno de acreção possa estar relacionada diretamente com o grau de plasticidade de folhelhos que, como visto nessa discussão, foi primordialmente dependente da composição mineralógica das amostras estudadas.

4. Conclusões

Com o objetivo de correlacionar a composição química e mineralógica com plasticidade, amostras de folhelhos foram caracterizadas e tiveram seus índices de plasticidades determinados pelos índices de Atterberg, sendo possível verificar a influência dos principais fatores que afetam a plasticidade de folhelhos. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que:

- O tipo de argilomineral presente foi o fator de principal influência na plasticidade dos folhelhos. Os argilominerais esmectita e illita, nessa ordem, conferiram maior plasticidade as amostras estudadas, e a presença de caulinita, uma menor plasticidade;

- Parte da perda de massa está associada a combustão de matéria orgânica dos folhelhos, a qual é considerada um fator que influencia na plasticidade;
- O maior percentual de partículas enquadradas na fração argila não implicou em um maior índice de plasticidade, sendo possível perceber que a distribuição do tamanho de partículas poderá ser um fator secundário na plasticidade das amostras de folhelhos estudadas;
- Os folhelhos foram classificados em fracamente e moderadamente plásticos, o que, provavelmente, poderá causar problemas de aglomeração e acreção em componentes de fundo de poço quando da perfuração de poços, sobretudo em folhelhos que possuem o argilomineral esmectítico.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES no desenvolvimento desse trabalho, assim como as instalações da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais (UAEMA) e a Unidade Acadêmica de Engenharia de Petróleo (UAEPetro) da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG.

Referências

- [1] E. van Oort. On the physical and chemical stability of shales. *Jornal Petroleum Science Engineering* 38 (2003) 213.
- [2] D. V. Lucena, L. V. Amorim, H. L. Lira, *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 10 (2015) 52.
- [3] M. Asef, M. Farrokhrouz, *Shale engineering: mechanics and mechanisms*, CRC Press, Boca Raton (2013).
- [4] R. Gholami, H. Elochukwua, N. Fakharib, M. Sarmadivalehc. A review on borehole instability in active shale formations: Interactions, mechanisms and inhibitors, *Earth-Science Reviews*, 177 (2018) 3.
- [5] A. Rana, M. K. Arfaj, T. A. Saleh. Advanced developments in shale inhibitors for oil production with low environmental footprints – A review. *Fuel*, 247 (2019) 240.
- [6] R.L. Anderson, I. Ratcliffe, H.C. Greenwell, P.A. Williams, S. Cliffe, P.V. Coveney. Clay swelling — A challenge in the oilfield, *Earth-Science Reviews*, 98 (2010) 202.
- [7] M. J. WILSON, L. WILSON. Clay mineralogy and shale instability: an alternative conceptual analysis. *Clay Minerals*, 49 (2014) 129.
- [8] C. A. Leal, M. N. C. Brunet, L. V. Amorim, H. L. Lira, F. C. C. Nogueira, W. R. P. Costa. Influence of reactivity and mineralogical composition on instability due to the disintegration of shales from Paraíba and Ceará States, Brazil. *Cerâmica*, 65 (2019) 405.
- [9] E. van Oort, R. Bland, R. Pessier. Drilling more stable wells faster and cheaper with pdc bits and water based muds. *IADC/SPE*, New Orleans, Louisiana, USA (2000) 2.
- [10] Q. K. Jadoon, E. M. Roberts, R. A. Henderson, T. G. Blenkinsop, R. A. J. Wust. Mineralogical variability of the Permian Roseneath and Murteree Shales from the Cooper Basin, Australia: Implications for shale properties and hydrocarbon extraction. *Jornal of Petroleum Science and Engineering*, 165 (2018) 850.
- [11] S. Cliffe, S. Young. Agglomeration and Accretion of Drill Cuttings in Water-Based Fluids. *AADE Fluids Conference and Exhibition held at the Wyndam Greenspoint Hotel, Houston, Texas, USA* (2008) 6.
- [12] M. J. Wilson, L. Wilson, M. V. Shaldybin. The importance of illitic minerals in shale instability and in unconventional hydrocarbon reservoirs. *The Geological Society of London*, 454 (2017) 1.
- [13] A. Sameni, A. Chamkalani. Application of least square support vector machine as a mathematical algorithm for diagnosing drilling effectivity in shaly formations. *Journal of Petroleum of Science and Technology*, 8 (2018) 3.
- [14] ABNT, NBR. NBR 6457: Amostras de solo-Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro, BR (1986).
- [15] ABNT, NBR. NBR 6459: Solo-Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, BR (1984).
- [16] ABNT, NBR. NBR 7180: Solo-Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, BR (1984).
- [17] J. M. R. Figueirêdo, J. R. S. Silva, G. A. Neves. Influence of processing variables on clay-based ceramic formulations. *Materials Research*, 22 (2019) 3.
- [18] I. A. Silva, F. K. A. Sousa, H. S. Ferreira, H. S. Ferreira, G. A. Neves, H. C. Ferreira. Efeito do armazenamento de argilas esmectíticas nas suas propriedades reológicas. *Cerâmica*, 63 (2017) 109.
- [19] K. Suguio. *Geologia sedimentar*. Edgard Blücher, (2003).
- [20] J. F. M. Motta, A. B. Luz, C. A. M. Baltar, M. S. Bezerra, M. Cabral Júnior, J. M. Coelho. Argila plástica para cerâmica branca. *Rochas e Minerais industriais*, 9 (2008) 33-46.
- [21] R. R. Menezes, G. A. Neves, H. C. Ferreira. Argilas plásticas do tipo “Ball Clay”. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 9 (2014), 121.
- [22] S. M. E. Stamatakis, S. Young, G. Stefano. The prevention and cure of bit balling in water based drilling fluids. *Fluids Conference and Exhibition Held at the Hilton Houston North, Houston (USA)*, 2011.
- [23] S. C. Maestrelli, C. D. Roveri, A. G. P. Nunes, L. M. Faustino, G. F. Aiello, L. P. A. Pinto, C. Manocchio, T. M. L. Cal, F. F. Ribeiro, N. A. Mariano. Estudo de caracterização de argilas não plásticas da região de Poços de Caldas, MG. *Cerâmica*, 59 (2013) 248.
- [24] A. R. V. Silva, H. C. Ferreira. Esmectitas organofílicas: conceitos, estruturas, propriedades, síntese, usos industriais e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 3 (2008) 2.

- [25] L. F. A. Campos, R. S. Macedo, P. K. Kiyohara, H. C. Ferreira. Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural. *Cerâmica*, 45 (1999) 140.
- [26] A. W. White. Atterberg plastic limits of clay minerals. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 34 (1949) 512.
- [27] C. M. F. Vieira, H. F. Sales, S. N. Monteiro. Efeito da adição de argila fundente íltica em cerâmica vermelha de argilas cauliníticas. *Cerâmica*, 50 (2004) 242.
- [28] R. P. S. Dutra, M. L. Varela, R. M. Nascimento, U. U. G, C. A. Paskocimas, P. T. Melo. Avaliação da Potencialidade de Argilas do Rio Grande do Norte – Brasil. *Cerâmica Industrial*, 11 (2006) 43.
- [29] R. S. Macedo, R. R. Menezes, G. A. Neves, H. C. Ferreira. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, 54 (2008) 414.