

Caracterização química, mineralógica e geotécnica de sedimentos da formação barreiras e pós-barreiras no litoral sul do Rio Grande do Norte, Brasil

Chemical, mineralogical and geotechnical characterization of the barreiras formation and post-barreiras sediments – southern coast of Rio Grande do Norte state, Brazil

Lisyanne Vasconcelos Freire¹; Olavo Francisco dos Santos Júnior²; Maria del Pilar Durante Ingunza³; Leonardo Flamarion Marques Chaves⁴; Osvaldo de Freitas Neto⁵

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: lisyannefreire@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2067-6679>

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: olavo.santos@ufrn.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7552-6646>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: pilarduranteingunza@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6994-7559>

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: flamarionmchaves@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4524-9988>

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Engenharia Civil, Natal/RN, Brasil. Email: osvaldo.neto@ufrn.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9488-4123>

Resumo: A Formação Barreiras, de origem sedimentar (idade Miocênica), se estende ao longo do litoral brasileiro e tem sido objeto de diversas pesquisas, devido sua extensão e variabilidade espacial, além de se encontrar numa região intensamente povoada e de elevado interesse econômico. Sobre ela encontra-se uma camada de sedimentos do Quaternário, denominados de Pós-Barreiras. O objetivo deste trabalho é o estudo das propriedades químicas, mineralógicas e geotécnicas de sedimentos da Formação Barreiras e Pós-Barreiras, localizadas no litoral sul do Rio Grande do Norte. Foram coletadas amostras de diferentes pontos para a realização de ensaios de fluorescência de raios-x, espectrofotometria de absorção atômica, difração de raios-x e análises através do microscópio eletrônico de varredura. As propriedades geotécnicas foram determinadas a partir de ensaios de granulometria, limites de liquidez e plasticidade e massa específica dos sólidos. Os resultados das análises químicas apresentaram silício, alumínio e ferro como principais elementos químicos. Os sedimentos da Formação Barreiras apresentaram elevadas concentrações de ferro e ocorrência dos minerais quartzo, caulinita, hematita e goetita. Foram classificados como SC ou SM. Por outro lado, os sedimentos Pós-Barreiras apresentaram quartzo, nacrita e anatásio, e baixo teor de óxido de ferro. Os sedimentos foram classificados como SC ou SC-SM de baixa a média plasticidade.

Palavras-chave: Formação Barreiras; Mineralogia; Caracterização Geotécnica.

Abstract: The Barreiras Formation, of sedimentar origin (Miocene-aged), extends along the Brazilian coast and has been studied by several researches due to its extension and spatial variability, besides being in an intensely populated region of high economic interest. This formation is overlain by Quaternary sediments, the so-called Post-Barreiras. The aim of this paper is the study of chemical, mineralogical and geotechnical properties of Barreiras Formation and Post-Barreiras sediments, located in Rio Grande do Norte south coastal region. The sediments were collected from different locations and x-ray fluorescence, atomic absorption spectrophotometry, x-ray diffraction and scanning electron microscopy tests were performed. Geotechnical properties were determined by sieve analysis, liquid and plastic limit and specific gravity of soil solids. The chemical analysis showed silicon oxide, aluminum and iron as the main chemical compounds. The Barreiras Formation sediments exhibited high iron oxide concentrations and the presence of quartz, kaolinite, hematite and goethite minerals. On the other hand, quartz, nacrite, anastasis, and a low iron oxide content were identified for Post-Barrier sediments. Geotechnically, the sediments were classified as SC or SC-SM of low to medium plasticity.

Keywords: Barreiras Formation; Mineralogy; Geotechnical Characterization.

Recebido: 21/12/2020; Aceito: 29/04/2021; Publicado: 09/09/2022.

1. Introdução

Ao longo da costa brasileira são encontrados depósitos sedimentares da Formação Barreiras, se estendendo desde o Amapá até o Rio de Janeiro. Essa formação preenche bacias sedimentares que tiveram origem durante a separação entre o continente africano e a América do Sul (Rossetti *et al.*, 2013). No seu topo encontra-se um horizonte de solo lateríticos recoberto, em algumas localidades, por sedimentos denominados de Pós-Barreiras, que representam grande parte do Quaternário costeiro do Brasil (Bezerra *et al.*, 2006).

A Formação Barreiras tem atraído a atenção dos pesquisadores em relação a sua idade, origem e propriedades geotécnicas. Um estudo detalhado dessa unidade é de extrema importância nos âmbitos da engenharia e da economia, uma vez que boa parte das obras de infraestrutura do estado do Rio Grande do Norte são construídas sobre essa formação. Além disso, há uma intensa utilização de seus sedimentos como jazidas para obras de terra. Dessa forma, é essencial a realização de um detalhado estudo geológico, mineralógico e geotécnico, subsidiando adequadamente as obras de engenharia. Para tanto, pesquisadores têm dedicado esforços para o estudo das propriedades dos sedimentos da Formação Barreiras presentes no estado do Rio Grande do Norte (Santos Jr. *et al.*, 2015; Lucena 2015; Souza, 2016; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018). No entanto, diante da dimensão e importância dessa formação para a região, percebe-se a necessidade de estudos complementares. Além disso, há uma lacuna no que diz respeito a caracterização dos sedimentos Pós-Barreiras. Portanto, o presente trabalho tem o objetivo de estudar diferentes áreas do litoral sul do Rio Grande do Norte, compreendendo sedimentos da Formação Barreiras e também sedimentos superficiais Pós-Barreiras, abordando as propriedades químicas, mineralógicas e geotécnicas.

2. Aspectos gerais e regionais da formação barreiras

A Formação Barreiras teve sua deposição iniciada no Mioceno médio, quando ocorreu aumento do nível do mar. A parte mais alta da formação formou-se no último episódio de transgressão e regressão do mar durante o mesmo período (Rossetti *et al.*, 2013). Tal processo de sedimentação do Mioceno teve fim com o rebaixamento do nível do mar. Segundo Rossetti *et al.* (2013), nesse momento houve a formação de um horizonte de solo laterítico no topo do Barreiras, que perdurou até o Quaternário. Durante esse período, a maior parte da costa brasileira permaneceu sem deposição de sedimentos, exposta a erosão subárea (vento e chuva) e ao desenvolvimento dessa camada laterítica, composta por concreções ferruginosas e grãos de quartzo arredondados. Após a formação desse horizonte, teve início a deposição dos sedimentos denominados de Pós-Barreiras.

Em relação a origem da Formação Barreiras, alguns autores consideram como sendo predominantemente continental (Vilas Bôas *et al.*, 2001; Lima *et al.*, 2006;). No entanto, na porção equatorial da formação, há registros de ambientes deposicionais influenciados por processos marinhos e ambientes de transição marinha. Na porção oriental, onde há uma ideia mais rígida de origem continental, também há evidências de deposição de sedimentos por influência marinha, inclusive em locais das bacias sedimentares Potiguar e Paraíba (Rossetti *et al.*, 2012; Rossetti *et al.*, 2013).

As regiões de estudo do presente trabalho localizam-se no litoral oriental do Rio Grande do Norte, no Nordeste brasileiro (Figura 1), englobando sedimentos provenientes tanto da Formação Barreiras quanto sedimentos Pós-Barreiras. Em termos geomorfológicos, a região é caracterizada pela presença de tabuleiros (Barreto *et al.*, 2004). Em alguns trechos do litoral os tabuleiros entram em contato com o mar formando as falésias (Santos Jr. *et al.*, 2015).

As Figuras 2a, 2b e 2c apresentam o perfil típico composto pela camada de sedimentos da Formação Barreiras e, sobre ela, uma camada de sedimentos do Quaternário, denominados de Pós-Barreiras. Esses dois horizontes são divididos por uma inconformidade marcada pela presença de um horizonte de solo laterítico bem desenvolvido, de cores variegadas, com espessura variando entre 3 e 10 m de espessura.

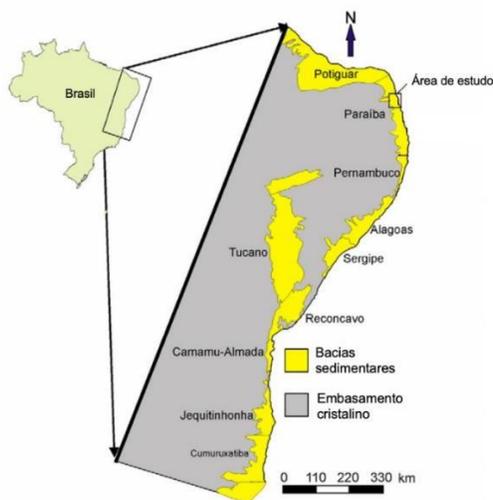
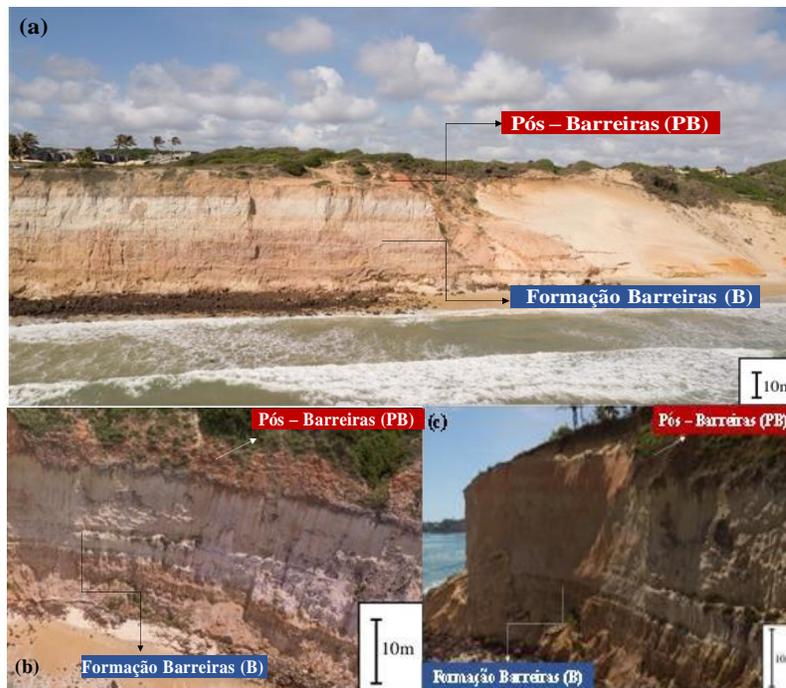


Figura 1 – Bacias sedimentares do litoral oriental do Brasil e localização da área de estudo.
 Fonte: Adaptado de Rossetti *et al.* (2013).

Uma revisão conjunta de pesquisas abordando a análise geotécnica de sedimentos da Formação Barreiras no Rio Grande do Norte foi feita por Santos Jr. *et al.* (2015). Os materiais foram classificados no Sistema Unificado de Classificação dos Solos, principalmente, como areia argilosa (SC). Todas as amostras apresentaram limite de liquidez menor que 50% e índice de plasticidade máximo de 20%. Os gráficos das Figuras 3 e 4 apresentam a carta de plasticidade e atividade das frações argilosas das amostras estudadas. Os dados foram atualizados para englobar trabalhos mais recentes, como o de Lucena (2015), Souza (2016), Barbosa (2017), Taquez (2017) e Sousa (2018).



Figuras 2a, 2b e 2c – Perfis típicos de falésias observados ao longo da costa oriental do Rio Grande do Norte, exibindo os horizontes de sedimentos da Formação Barreiras e Pós-Barreiras
 Fonte: Autores, 2020.

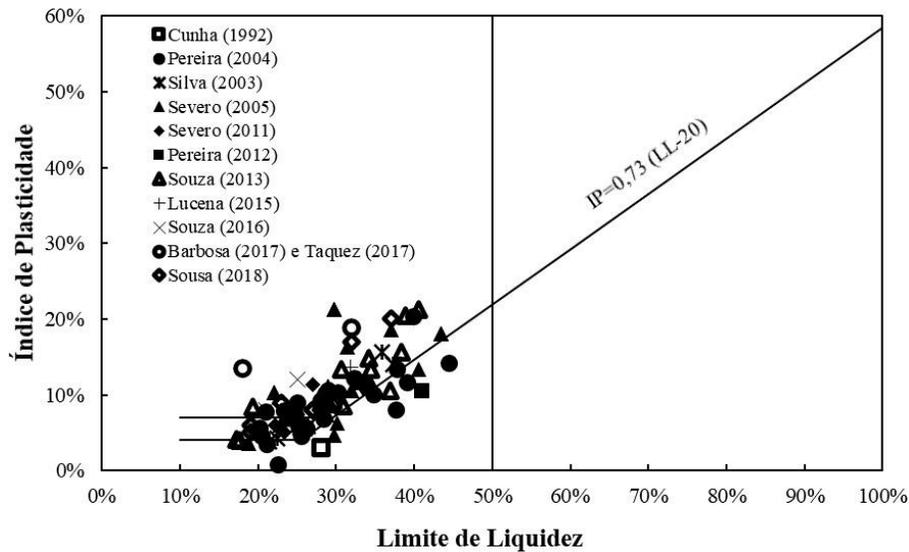


Figura 3 – Carta de plasticidade de solos da Formação Barreiras no estado do Rio Grande do Norte.
 Fonte: Adaptado de Santos Jr. *et al.* (2015).

3. Materiais e métodos

O programa experimental consistiu na definição de áreas ao longo do litoral sul do estado do Rio Grande do Norte, onde são encontrados sedimentos da Formação Barreiras (B1, B2 e B3) e do Pós-Barreiras (PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4). As amostras B1, B2 e B3 foram coletadas em escavações de jazidas ou áreas de empréstimo que forneceram materiais utilizados para a execução de aterros rodoviários. As amostras PB0 a PB4, foram retiradas de pontos superficiais de taludes de cortes ao longo da BR-101. As coordenadas geográficas dos locais de coleta estão apresentadas na Tabela 1 representadas na Figura 5, respectivamente.

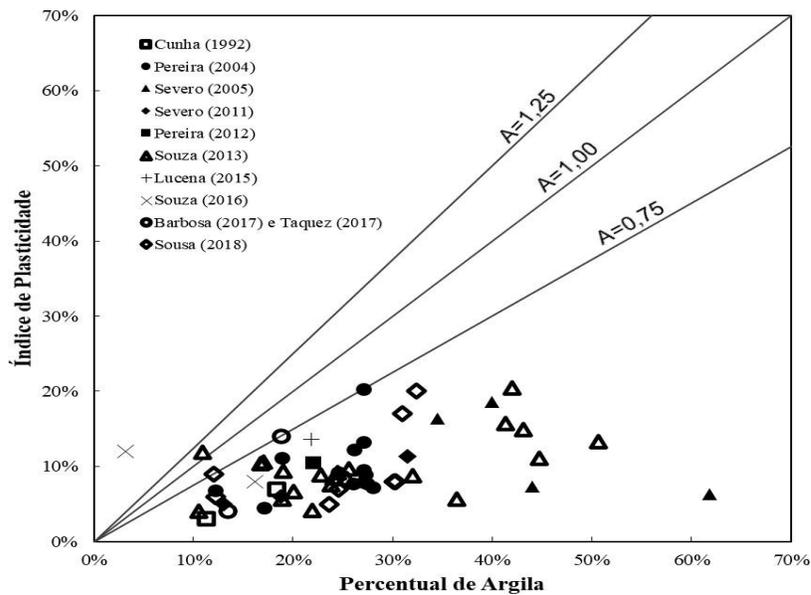


Figura 4 – Atividade das frações argilosas de solos da Formação Barreiras no Rio Grande do Norte.
 Fonte: Adaptado de Santos Jr. *et al.* (2015).

Tabela 1 – Coordenadas geográficas dos pontos de coleta de amostras

Amostra	Latitude	Longitude
B1	6°05'15''S	35°14'02''O
B2	6°13'47''S	35°08'38''O
B3	6°30'15''S	35°06'40''O
PB0	5°45'41''S	35°13'27''O
PB1	5°57'25''S	35°15'54''O
PB2	6°07'10''S	35°13'46''O
PB3	6°07'26''S	35°13'45''O
PB4	6°16'45''S	35°12'19''O

Fonte: Autores, 2020.

3.1. Amostras da Formação Barreiras (B1, B2 e B3)

A análise química e mineralógica das amostras B1, B2 e B3 consistiu na divisão dos materiais coletados em duas frações denominadas de concreção, quando maior que 9,5 mm, e sedimento, quando menor que 9,5 mm. A diferenciação entre sedimento e concreção foi feita com o intuito de se estudar de forma mais aprofundada as concreções ferruginosas que se formam em materiais lateríticos pertencentes a Formação Barreiras no RN.

Posteriormente, as frações foram divididas em subfrações, de acordo com a Tabela 2. A separação da fração sedimento em subfrações, consistiu no processo de peneiramento mecânico por via úmida. Nesse processo, os materiais com diâmetro maior que 0,075 mm passam por defloculação e peneiramento com o auxílio de água corrente. Para a separação dos materiais com diâmetro menor que 0,075 mm, foi realizada sedimentação. A fração concreção, por sua vez, foi imersa em água por quatro dias e, posteriormente, desagregada por impacto. Em seguida o material foi destorroado e submetido a sedimentação, obtendo-se as duas subfrações, conforme Tabela 2.

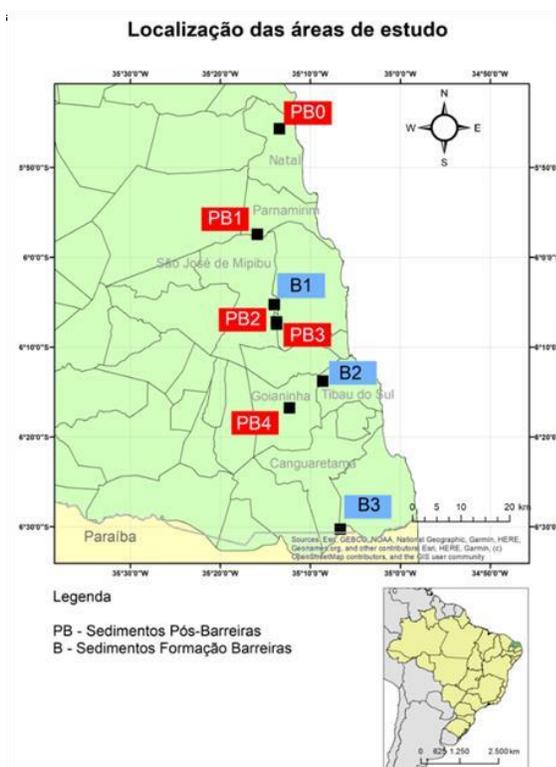


Figura 5 – Localização dos pontos de coleta de amostras ao longo do litoral sul do Rio Grande do Norte.

Fonte: Autores, 2020.

Todas as subfrações foram submetidas a ensaios de análise química por espectrofotometria de absorção atômica e difração de raios-x (DRX). A microestrutura das concreções foi observada por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) Stereoscan Mark 2, da Cambridge Instrument Company.

Os ensaios de caracterização geotécnica seguiram recomendações da NBR 6457 (2016). A preparação se deu com secagem prévia, com amostra seca ao ar e posterior destorroamento e homogeneização. As Análises Granulométricas foram conduzidas à luz da NBR 7181 (ABNT, 2016), a Massa Específica dos Grãos conforme a NBR 6508 (ABNT, 1984), o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP) de acordo com as NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente.

Tabela 2 – Frações e subfrações dos sedimentos e ensaios realizados nas amostras da Formação Barreiras (B) e Pós Barreiras (PB)

Fração	Subfração (mm)	Ensaio		
		Análise Química	DRX	MEV
Concreção	0,075 - 0,002	X	X	X
	< 0,002	X	X	
Sedimento	9,5 - 2,00	X	X	-
	2,00 - 0,075	X	X	-
	0,075 - 0,002	X	X	-
	< 0,002	X	X	-

Fonte: Autores, 2020.

3.2. Amostras Pós Barreiras (PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4)

A amostra PB0 foi, primeiramente, separada nas frações areia e argila e, só então, submetida aos ensaios de FRX, DRX e também à análise por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), utilizando o equipamento SSX-550 da Shimadzu. A separação por granulometria foi realizada com vistas a identificação dos componentes químicos e mineralógicos de cada fração. Inicialmente, utilizou-se a peneira de abertura 0,075 mm para a separação do material grosso do fino. A areia retida foi lavada e seca em estufa. O material fino que passou na peneira foi separado e a ele adicionado solução de hexametáfosfato de sódio. Essa solução foi deixada em repouso por 24 horas e, posteriormente, submetida a agitação mecânica. Depois foi vertida em um béquer para, novamente, ser deixada em repouso por mais 24 horas. Utilizou-se do método de sedimentação, baseado na Lei de Stokes. A parte superior dessa suspensão foi retirada e levada para secar em estufa, obtendo-se a fração de argila.

As amostras PB1 a PB4 foram submetidas à realização de Análise Química Semiquantitativa por Fluorescência de Raios-X com Perda ao Fogo (FRX), utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu, e Difração de Raios-X para a identificação de fases cristalinas (DRX), utilizando o equipamento XRD-6000 da Shimadzu. Essas análises foram realizadas com amostras integrais, sem separação das frações areia e argila.

Os ensaios de caracterização geotécnica para as amostras PB seguiram as mesmas normas e procedimentos usados nos ensaios da Formação Barreiras descritos no item 3.1.

4. Caracterização dos sedimentos da formação barreiras (b)

4.1. Análise Química e Mineralógica das Amostras B1, B2 e B3

Os resultados das análises químicas das amostras B1, B2 e B3 estão apresentadas nas Tabelas 3, 4 e 5 respectivamente. Os principais óxidos identificados foram o óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃). No quadro consta também a relação sílica/sesquióxido (Kr). De acordo com Winterkorn e Fang (1991), solos lateríticos apresentam Kr<2 para a fração argila. Todas as subfrações com diâmetro menor que 0,002mm apresentaram Kr<2.

Tabela 3 – Resultado dos ensaios de FRX da amostra B1 expressos em %.

Material	B1-S				B1-C	
	I	II	III	IV	V	VI
φ (mm)						

	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
SiO₂	77,40	91,26	51,50	31,40	51,81	8,74
Fe₂O₃	11,58	2,00	8,00	6,20	37,15	34,77
Al₂O₃	6,00	4,41	37,20	30,71	3,62	15,10
TiO₂	0,29	0,11	0,62	0,69	0,67	0,28
MnO	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CaO	0,85	0,29	0,05	0,08	0,05	0,09
MgO	0,06	0,02	0,07	0,12	0,02	0,20
Na₂O	0,10	0,12	0,17	3,60	0,05	6,50
K₂O	0,08	0,06	0,11	0,11	0,04	0,55
P₂O₅	0,07	0,02	0,23	13,20	0,25	22,45
P.F.	3,26	1,22	1,98	13,83	6,23	11,37
K_r	9,83	27,29	2,07	1,54	3,23	0,40

Legenda: S - Fração Sedimento; C - Fração Concreção; ϕ - diâmetro; P.F. - Perda ao Fogo; I - 9,5mm a 2,00mm; II - 2,00mm a 0,075mm; III - 0,075mm a 0,002mm; IV - < 0,002mm; V - 0,075mm a 0,002mm; VI - < 0,002mm.

Fonte: Autores, 2020.

Tabela 4 – Resultado dos ensaios de FRX da amostra B2 expressos em %.

Material	B2-S				B2-C	
	I (%)	II (%)	III (%)	IV (%)	V (%)	VI (%)
ϕ (mm)						
SiO₂	69,30	70,94	43,52	39,50	66,38	37,42
Fe₂O₃	15,97	2,80	6,80	6,45	18,85	19,35
Al₂O₃	7,63	17,37	34,00	28,96	4,36	11,29
TiO₂	0,69	1,25	1,72	2,08	0,62	0,78
MnO	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CaO	0,53	0,04	0,05	0,07	0,05	0,08
MgO	0,05	0,05	0,05	0,07	0,04	0,07
Na₂O	0,14	0,10	0,11	1,30	0,08	4,20
K₂O	0,10	0,06	0,05	0,05	0,07	0,18
P₂O₅	0,07	0,02	0,38	5,68	0,11	15,30
P.F.	5,44	7,26	13,35	15,73	4,38	13,22
K_r	6,61	6,30	1,93	2,03	6,89	2,69

Legenda: S - Fração Sedimento; C - Fração Concreção; ϕ - diâmetro; P.F. - Perda ao Fogo; I - 9,5mm a 2,00mm; II - 2,00mm a 0,075mm; III - 0,075mm a 0,002mm; IV - < 0,002mm; V - 0,075mm a 0,002mm; VI - < 0,002mm.

Fonte: Autores, 2020.

Tabela 5 – Resultado dos ensaios de FRX da amostra B3 expressos em %.

Material	B3-S				B3-C	
	I (%)	II (%)	III (%)	IV (%)	V (%)	VI (%)
ϕ (mm)						
SiO₂	74,30	86,58	50,98	37,64	24,66	29,80
Fe₂O₃	9,85	0,08	2,30	2,70	49,05	30,00
Al₂O₃	10,13	7,43	31,20	27,80	13,20	22,90
TiO₂	0,62	0,42	2,08	2,08	0,78	0,62
MnO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
CaO	0,08	1,21	0,04	0,07	0,02	0,14
MgO	0,04	0,04	0,05	0,07	0,05	0,07

Na₂O	0,09	0,09	0,14	0,13	0,12	1,10
K₂O	0,06	0,10	0,03	0,10	0,06	0,08
P₂O₅	0,03	0,03	0,37	0,21	0,34	1,34
P.F.	4,74	3,27	12,75	16,40	11,36	13,83
K_r	7,70	19,68	2,65	2,17	0,94	1,21

Legenda: S - Fração Sedimento; C - Fração Concreção; ϕ - diâmetro; P.F. - Perda ao Fogo; I - 9,5mm a 2,00mm; II - 2,00mm a 0,075mm; III - 0,075mm a 0,002mm; IV - < 0,002mm; V - 0,075mm a 0,002mm; VI - < 0,002mm.

Fonte: Autores, 2020.

A Tabela 6 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de DRX. De uma forma geral, foram identificados caulinita como o argilomineral presente em quase todas as subfrações de sedimento e concreção. Foi observado também quartzo em todas as subfrações com diâmetro maior que 0,002 mm. Os minerais goetita e hematita também foram detectados, com maior ocorrência de goetita. Os aspectos químicos e mineralógicos são discutidos separadamente para cada amostra e a variação de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ (principais óxidos) em relação ao diâmetro dos grãos das frações sedimento e concreção são avaliadas.

A Figura 6 apresenta a relação entre os teores dos principais óxidos e o diâmetro médio das partículas amostra B1. Para a fração sedimento, o teor óxido de silício foi predominante nos tamanhos silte e areia. O teor mais elevado desse óxido foi detectado para o tamanho correspondente a areia, ao mesmo tempo esse tamanho apresenta baixos teores dos óxidos de ferro e alumínio. Para o tamanho silte ocorrem os maiores valores de Al₂O₃. Para o tamanho argila, os óxidos de silício e alumínio estão presentes em iguais proporções. A quantidade de óxido de ferro, no entanto, é baixa e varia muito pouco em relação aos diâmetros para essa fração. A fração concreção, por outro lado, apresenta elevado teor desse óxido, tanto para o tamanho argila como para o tamanho silte. Além disso, o tamanho silte apresenta maior teor SiO₂ e menor teor de Al₂O₃ do que a argila.

Nas análises mineralógicas por meio de DRX, foram detectados quartzo e caulinita em praticamente todas as amostras das subfrações, tanto da fração sedimento como da concreção. A goetita também foi estivesse presente nas subfrações correspondente ao tamanho silte da fração sedimento e em todas do tamanho argila. Por fim, com o auxílio do MEV, na fração concreção foram identificadas partículas de quartzo com texturas polidas e rugosas, cimentadas por óxidos de ferro.

Tabela 6 – Resumo dos resultados de DRX dos sedimentos da Formação Barreiras (B1, B2 e B3).

Material	ϕ (mm)	Minerais Encontrados
B1-S	I	Quartzo, Caulinita
B1-S	II	Quartzo, Caulinita
B1-S	III	Quartzo, Caulinita, Goetita,
B1-S	IV	Quartzo, Caulinita, Goetita
B1-C	V	Quartzo
B1-C	VI	Quartzo, Caulinita, Goetita
B2-S	I	Quartzo, Caulinita, Goetita
B2-S	II	Quartzo,
B2-S	III	Quartzo, Caulinita, Goetita
B2-S	IV	Caulinita, Goetita
B2-C	V	Quartzo, Caulinita, Goetita
B2-C	VI	Quartzo, Caulinita, Goetita, Hematita
B3-S	I	Quartzo, Caulinita
B3-S	II	Quartzo, Caulinita
B3-S	III	Quartzo, Goetita
B3-S	IV	Goetita, Hematita
B3-C	V	Quartzo, Goetita, Hematita
B3-C	VI	Quartzo, Caulinita, Goetita

Legenda: S - Fração Sedimento; C - Fração Concreção; ϕ - diâmetro; I - 9,5mm a 2,00mm; II - 2,00mm a 0,075mm; III - 0,075mm a 0,002mm; IV - < 0,002mm; V - 0,075mm a 0,002mm; VI - < 0,002mm.

Fonte: Autores, 2020.

A variação dos principais óxidos em relação ao diâmetro médio dos grãos da amostra B2 é apresentada na Figura 7. O óxido de silício é predominante em todas as subfrações das frações sedimento e concreção, sendo os teores mais elevados encontrados nas partículas com tamanho referente a areia. Na fração sedimento, o óxido de alumínio está mais presente do que o de ferro e encontrado em maior proporção para a subfração equivalente ao tamanho silte. Na concreção, no entanto, o teor de Fe_2O_3 é mais elevado do que para a fração sedimento, embora o SiO_2 continue predominante. O tamanho silte apresenta teor de óxido de alumínio menor do que a argila, porém maior teor de óxido de silício.

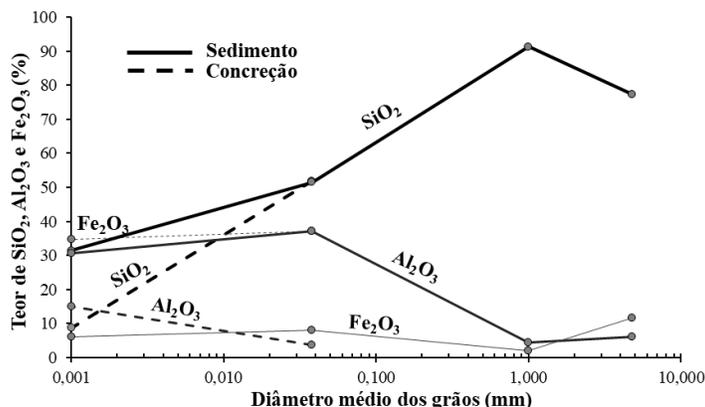


Figura 6 – Variação dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 para a amostra B1.
Fonte: Autores, 2020.

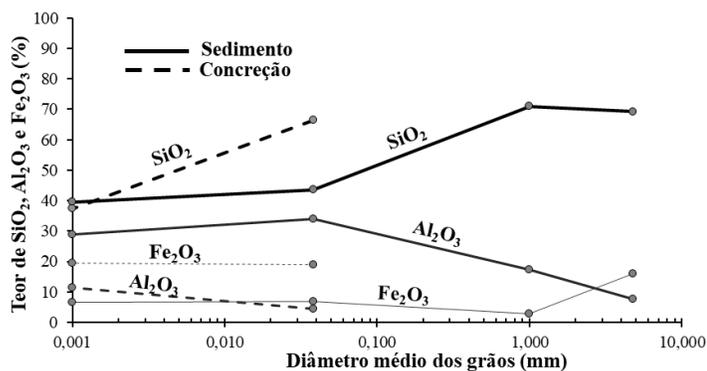


Figura 7 – Variação dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 para a amostra B2.
Fonte: Autores, 2020.

As análises mineralógicas da amostra B2 identificaram a presença de quartzo, caulinita e goetita. A hematita foi identificada, porém, apenas para a subfração da concreção correspondente ao tamanho argila. A observação das concreções dessa jazida pelo MEV, mostrou partículas de quartzo com superfície rugosa e desgastada, e com cimentação dos grãos por óxidos de ferro.

O gráfico da Figura 8 foi obtido a partir da correlação entre os teores dos principais óxidos com o diâmetro médio dos grãos da amostra B3. O óxido de silício é predominante na fração sedimento para todas as subfrações, sendo maior para o diâmetro correspondente ao tamanho areia, seguido pelo óxido de alumínio e ferro em ordem decrescente. É importante notar que o Fe_2O_3 se encontra em quantidades muito pequenas para a fração sedimento. Para essa fração pode-se observar também que o teor de Al_2O_3 é maior para o tamanho silte. Em relação a concreção, o teor de óxido de ferro é significativamente mais elevado, sendo a maior quantidade encontrada na subfração silte. Os óxidos de silício e de alumínio são encontrados em maiores quantidades para o tamanho argila do que para o tamanho silte.

Os difratogramas do DRX obtidos para a amostra B3 apresentaram os minerais quartzo, caulinita, goetita e hematita. A goetita foi encontrada em praticamente todas as subfrações e a hematita nas subfrações correspondentes ao tamanho

argila do sedimento e da concreção. A análise por meio de MEV resultou na observação de partículas de quartzo rugosas altamente cimentadas por óxidos de ferro.

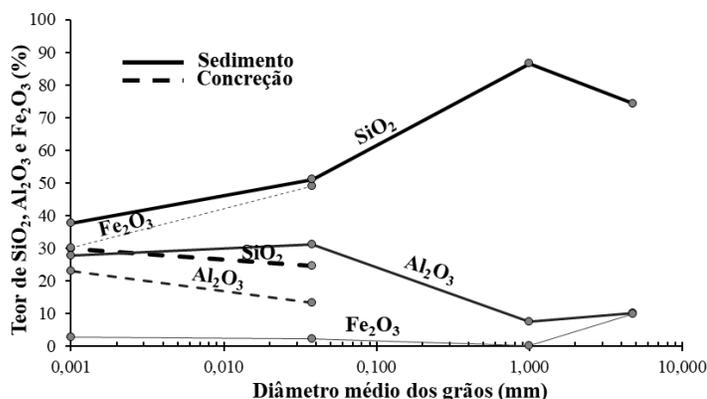


Figura 8 – Variação dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ para a amostra B1.
Fonte: Autores, 2020.

4.2. Caracterização Geotécnica das Amostras B1, B2 e B3

As curvas granulométricas obtidas nas amostras B1, B2 e B3 são apresentadas na Figura 9. Os demais resultados de caracterização geotécnica dos sedimentos são mostrados na Tabela 7.

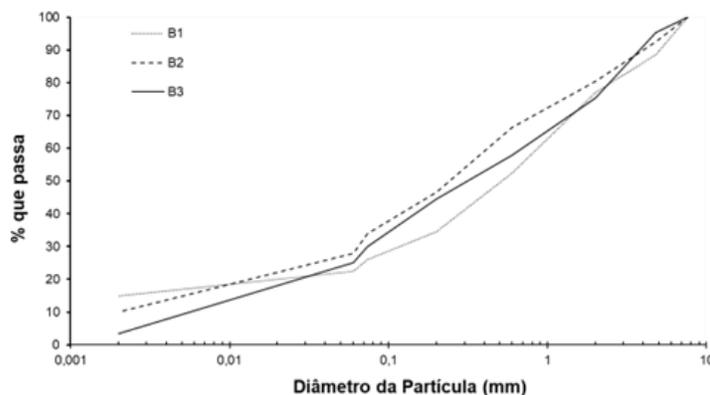


Figura 9 – Curvas granulométricas dos sedimentos da Formação Barreiras (Amostras B1, B2 e B3).
Fonte: Autores, 2020.

Tabela 7 – Resumo da caracterização geotécnica dos sedimentos da Formação Barreiras (Amostras B1, B2 e B3).

#	Amostras		
	B1	B2	B3
γ_s (kN/m ³)	26,7	26,7	26,6
LL (%)	24,0	28,0	23,0
LP (%)	17,0	19,0	-
IP (%)	7,0	9,0	NP
Atividade	0,47	0,90	-
Classificação (SUCS)	SC	SC	SM

Legenda: LL – Limite de Liquidez; LP – Limite de Plasticidade; IP – Índice de Plasticidade; NP – Não Plástico;
Fonte: Autores, 2020.

Os sedimentos foram classificados como areia argilosa – SC e areia siltosa – SM, segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). A amostra B1 apresentou baixa plasticidade, enquanto a amostra B2 apresentou plasticidade média. O sedimento correspondente a B3 foi classificado como não plástico. A fração argilosa da amostra B1, com índice de atividade igual a 0,47, é classificada como inativa, enquanto a argila que compõe B2 é considerada de atividade normal.

As características de plasticidade dos materiais devem-se a afinidade da fração fina dos sedimentos com a água. O fato de os materiais apresentarem baixa e média plasticidade e, conseqüentemente, baixa atividade da fração argilosa são compatíveis com a presença de caulinita (argilomineral 1:1 de baixa atividade) e de minerais ricos em ferro na fração fina (silte e argila). Baixas plasticidade e atividade foram identificadas para outros sedimentos da Formação Barreiras no estado do Rio Grande do Norte (Santos Jr. *et al.*, 2015), e correspondem ao esperado para solos lateríticos. Esses materiais apresentam resistência e comportamento tensão-deformação fortemente influenciados pela cimentação natural formada entre as partículas devido a presença de óxidos de ferro em sua composição mineralógica.

5. Caracterização dos sedimentos pós-barreiras (pb)

5.1. Análise Química e Mineralógica das Amostras PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4

Os resultados dos ensaios de FRX e DRX são apresentados nas Tabelas 8 e 9, respectivamente. A amostra PB0 foi separada nas frações areia e argila, para permitir a comparação direta com as amostras da Formação Barreiras (divididas em concreção e sedimento). As demais foram analisadas com amostras integrais, sem separação.

Tabela 8 – Resultados de FRX dos sedimentos Pós-Barreiras (Amostras PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4) expressos em %.

Material	PB0		PB1	PB2	PB3	PB4
	I	II				
ϕ (mm)						
SiO ₂	71,91	31,53	61,73	56,54	46,69	54,75
Al ₂ O ₃	10,55	34,08	30,87	36,22	37,54	37,69
Fe ₂ O ₃	2,67	10,19	1,73	2,12	4,09	1,95
TiO ₂	0,52	1,31	0,87	0,67	0,57	0,51
K ₂ O	-	0,33	0,14	0,12	0,10	0,13
SO ₃	0,19	-	0,09	0,11	0,08	0,10
CaO	0,33	0,27	-	0,06	0,12	-
ZrO ₂	0,04	0,02	0,06	0,02	0,02	0,02
Cr ₂ O ₃	-	0,04	0,01	0,01	0,02	0,01
MnO	-	0,01	0,01	0,01	0,02	-
ZnO	0,01	0,02	-	-	-	-
CuO	0,01	0,03	-	-	-	-
P ₂ O ₅	-	7,38	-	-	-	-
SrO	-	0,01	-	-	-	-
P.F.	13,77	14,78	4,49	4,12	7,75	4,84

Legenda: ϕ - diâmetro; P.F. - Perda ao Fogo; I - 2,00mm a 0,075mm; II < 0,002mm;

Fonte: Autores, 2020.

Os principais óxidos identificados na análise química da amostra PB0 foram o óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃), tal qual para os sedimentos da Formação Barreiras (B1, B2 e B3). O composto químico SiO₂ também foi identificado em maior quantidade para a areia, seguido pelo Al₂O₃ e o Fe₂O₃. A partir desses resultados, foi calculada a relação sílica/sesquióxido para a fração argila, que resultou em Kr = 1,3 (menor do que 2), caracterizando um material laterítico (Winterkorn e Fang, 1991). A quantidade de óxido de ferro presente nas frações areia e argila assemelha-se a quantidade encontrada para a fração sedimento da Formação Barreiras. Os elevados teores de ferro, associados a formação de concreções ferruginosas, não foram observados para a amostra PB0.

Tabela 9 – Resultados de DRX dos sedimentos Pós-Barreiras (Amostras PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4).

Amostra	Minerais Encontrados
PB0 Fração Areia	Quartzo SiO_2 e Nacrita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
PB0 Fração Argila	Nacrita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
PB1	Quartzo (SiO_2), Nacrita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e Anatásio (TiO_2)
PB2	Quartzo (SiO_2), Nacrita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e Anatásio (TiO_2)
PB3	Quartzo (SiO_2), Nacrita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e Anatásio (TiO_2)
PB4	Quartzo (SiO_2), Nacrita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e Anatásio (TiO_2)

Fonte: Autores, 2020.

Através da Difração de Raios-X realizadas nas amostra PB0 foram identificadas duas fases cristalinas: SiO_2 , correspondente ao quartzo; $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ que corresponde à nacrita (polimorfo da caulinita). Em relação a argila, foi identificado apenas a nacrita- $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Os argilominerais com essa composição são do tipo 1:1, o que é consistente com a baixa atividade identificada para a fração argilosa na caracterização geotécnica. Diferentemente dos sedimentos da Formação Barreiras, na amostra PB0 não foram identificadas a goetita e a hematita nas análises de DRX.

As sub-frações da amostra PB0 foram analisadas através de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A Figura 10 apresenta microfotografias das partículas de areia, silte e argila. Na Figura 10a são mostrados grãos de areia com aumento de 40x. Observa-se, em geral, grãos com baixa esfericidade e rugosos, variando entre angulosos e subangulosos. A Figura 10b apresenta um grão de quartzo com material fino incrustado nas reentrâncias. Na Figura 10c e d é possível observar a presença de algumas partículas de silte, envoltas por partículas de argila aglomeradas.

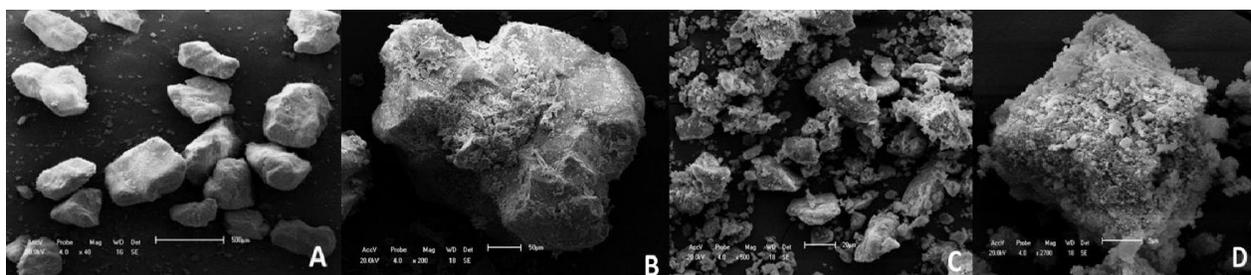


Figura 10 – Microfotografia de MEV a) e b) areia ($0,075 \text{ mm} \leq \phi \leq 2,00 \text{ mm}$) e c) e d) silte e argila ($\phi \leq 0,075 \text{ mm}$).

Fonte: Autores, 2020.

Quantos às amostras PB1, PB2, PB3 e PB4, os ensaios de FRX e DRX identificaram composições químicas e mineralógicas semelhantes para as quatro amostras. Os principais óxidos presentes nas quatro amostras são óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3), assim como para a amostra PB0. Todas as amostras do Pós Barreiras apresentaram relação sílica-sesquióxido igual ou superior a 2. De acordo com a norma DNIT-ES 098/2007, um dos requisitos para um sedimento ser considerado laterítico é apresentar $K_r < 2$, portanto, com base nesse parâmetro, essas amostras podem ser classificadas como não lateríticas.

As análises mineralógicas realizadas para as amostras PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4 identificaram quartzo, nacrita e ainda anatásio. Nos DRX dessas amostras também não foram identificados hematita e goetita. A semelhança entre as características química e mineralógicas observadas para as amostras PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4 leva a inferir que estas pertencem à uma mesma formação.

5.2. Caracterização Geotécnica das Amostras PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4

A Figura 11 apresenta o resultado análise granulométrica das amostras PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4. Os resultados dos ensaios demonstram a semelhança granulométrica entre os materiais, com curvas praticamente coincidentes. Os resultados mostram que os sedimentos Pós-Barreiras, apresentam menor quantidade de pedregulhos e maior teor de finos (material que passa na peneira #200) do que os sedimentos da Formação Barreiras (B1, B2, e B3).

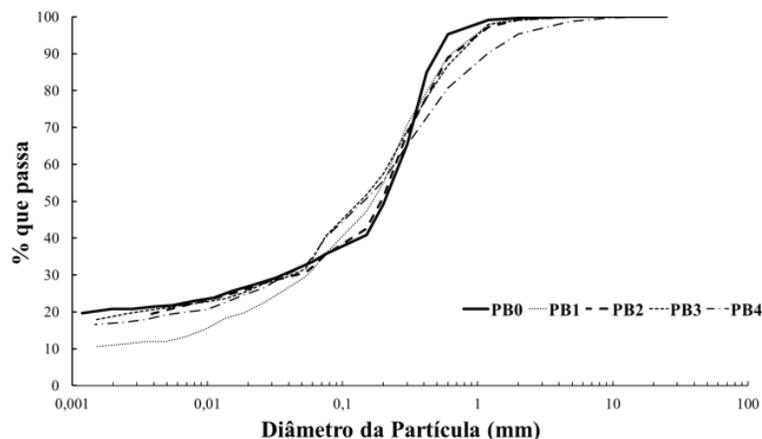


Figura 11 – Curvas granulométricas dos sedimentos Pós- Barreiras (Amostras PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4).
Fonte: Autores, 2020.

A tabela 10 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de caracterização onde é possível observar que o IP variou entre 6 e 8%, caracterizando sedimentos de baixa e média plasticidade, sendo a fração argilosa inativa. As amostras não diferem significativamente daquelas da Formação Barreiras no que se refere a plasticidade e atividade da fração argilosa, ambas resultado da presença de argilominerais do tipo 1:1 na composição química. A presença de menos óxidos de ferro nos sedimentos Pós-Barreira, levam a inferir que tais solos apresentem comportamento mecânico diferente, sendo necessário levar em consideração esse aspecto quando da utilização desses materiais em obras de engenharia. Os materiais foram classificados como areia argilosa (SC) e areia argilo-siltosa (SC-SM). Apesar dos pontos de coleta estarem localizados ao longo de um trecho de aproximadamente 85 km, os materiais exibiram características muito similares em todos os aspectos da caracterização.

Tabela 10 – Resumo da caracterização dos sedimentos da Formação Barreiras (Amostras PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4).

#	-	Amostras				
		PB0	PB1	PB 2	PB3	PB4
γ_s (kN/m ³)		26,4	26,1	26,6	25,9	26,7
LL (%)		24,0	27,0	26,0	26,0	28,0
LP (%)		15,0	20,0	20,0	20,0	20,0
IP (%)		8,0	7,0	7,0	6,0	8,0
Atividade		0,40	0,65	0,37	0,29	0,48
Classificação (SUCS)		SC	SC-SM	SC-SM	SC-SM	SC

Legenda: LL – Limite de Liquidez; LP – Limite de Plasticidade; IP – Índice de Plasticidade; NP – Não Plástico;

Fonte: Autores, 2020.

6. Conclusão

O presente estudo analisou os aspectos químicos, mineralógicos e geotécnicos de sedimentos da Formação Barreiras e do Pós-Barreiras, no estado do Rio Grande do Norte. No geral, pode-se dizer que os elementos químicos mais importantes na formação desses sedimentos são: silício, alumínio e ferro.

Em relação as distribuições dos principais óxidos encontrados nos sedimentos da Formação Barreiras em função do diâmetro médio dos grãos, algumas generalizações podem ser feitas: (1) as frações com maiores diâmetros apresentam,

predominantemente, os maiores teores de óxido de silício e os menores teores de óxido de alumínio; (2) a fração sedimento é formada por óxido de silício, alumínio e ferro, em ordem decrescente; (3) entre a fração sedimento e a fração concreção observa-se uma grande diferença no teor de óxido de ferro, admitindo-se que a acumulação dos óxidos de ferro é o principal requisito de formação das concreções. As análises mineralógicas revelaram a ocorrência dos minerais quartzo, caulinita, hematita e goetita. A observação das concreções das amostras B1, B2 e B3 revelaram partículas de quartzo com texturas variando entre polidas e rugosas e com cimentação ferruginosa. Em termos de classificação geotécnica os sedimentos foram classificados no Sistema Unificado de Classificação dos Solos como SC (Areia Argilosa) ou SM (Areia Siltosa). Apresentam baixa a média plasticidade e fração argilosa de baixa a média atividade, resultante da presença de caulinita e de minerais ricos em ferro na fração fina.

As análises químicas dos sedimentos Pós-Barreiras (PB0, PB1, PB2, PB3 e PB4) apresentaram menor quantidade de óxido de ferro do que os da Formação Barreiras. As análises de DRX identificaram quartzo, nacrita e anatásio. A hematita e a goetita não foram identificadas, diferenciando-se dos sedimentos da Formação Barreiras. Em termos geotécnicos, os sedimentos foram identificados como SC (Areia Argilosa) ou SC-SM (Areia Silto-Argilosa) de baixa a média plasticidade. A fração argilosa apresenta baixa atividade, atribuída a presença de argilominerais do tipo 1:1.

A comparação entre os dados obtidos para os sedimentos da Formação Barreiras e Pós-Barreiras mostra diferença na composição química, principalmente em relação a presença de óxido de ferro, responsável pela formação da cimentação natural entre as partículas. Apesar de apresentarem classificação geotécnica muito parecida, a diferença na composição química e mineralógica pode resultar em comportamentos mecânico diferentes entre os dois tipos de sedimentos. A cimentação ferruginosa dos sedimentos da Formação Barreiras fornece coesão ao material, o que explica a presença de taludes íngremes, como é o caso das falésias ao longo do litoral do Rio Grande do Norte.

Por fim, os dados coletados no presente trabalho visaram contribuir para a base de dados de solos da Formação Barreiras e o melhor entendimento do comportamento dos solos encontrados no litoral sul do Rio Grande do Norte, bem como o uso mais racional desses materiais na obras de engenharia.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisas Científicas e Tecnológicas - CNPq - Ministério da Ciência e Tecnologia e Coordenação de Pós-Graduação do Ensino Superior - CAPES - Ministério da Educação - Brasil pelo apoio financeiro ao grupo de pesquisa.

Referências

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459 – *Solo: Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180 – *Solo: Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457 – *Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181 – *Solo: Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- Barreto, A.M.F.; Suguio, K.; Bezerra, F.H.R.; Tatum, S.H.; Yee, M.; Giannini, P.C.F. Geologia e Geomorfologia do Quaternário Costeiro do Estado do Rio Grande do Norte. *Revista do Instituto de Geociências - USP Geol.*, v. 4, n. 2, p. 1–12, 2004.
- BARBOSA, N.M. *Estabilidade das Falésias da Barreira do Inferno – RN*. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- Bezerra, F.H.R.; Mello, C. L.; Suguio, K. A Formação Barreiras: Recentes avanços e antigas questões. *Geologia USP - Serie Científica*, v. 6, n. 2, 2006.

-
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT-ES 098: Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2007.
- Lima, C.C.U. DE; Vilas Boas, G.D.S.; Bezerra, F.H.R. Faciologia e análise tectônica preliminar da Formação Barreiras no Litoral Sul do estado da Bahia, Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, v. 6, n. 2, p. 71–80, 2006.
- LUCENA, T. S. *Efeito da variação do teor de umidade e da energia de compactação sobre as propriedades mecânicas de um solo laterítico*. 13 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- PEREIRA, I.C.B.B.A. *Contribuição ao Conhecimento do Meio Físico da Região do Complexo Estuarino-Lagunar Nísia Floresta-Papeba-Guaráiras*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.
- PEREIRA, K.L.A. *Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- Rossetti, D.F.; Góes, A.M.; Bezerra, F.H.R.; Valeriano, M.M.; Brito-Neves, B.B.; Ochoa, F.L. Contribution to the stratigraphy of the onshore Paraíba basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 84, n. 2, p. 313–333, 2012.
- Rossetti, D. F.; Bezerra, F. H. R.; Dominguez, J. M. L. Late oligocene-miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of brazil. *Earth-Science Reviews*, v. 123, p. 87–112, 2013.
- Santos Júnior, O. F.; Coutinho, R. Q.; Severo, R. N. F. Propriedades Geotécnicas dos Sedimentos da Formação Barreiras no Litoral do Rio Grande do Norte - Brasil. *Geotecnia*, v. 134, p. 87–108, 2015.
- SEVERO, R.N.F. *Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa – RN*. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.
- SEVERO, R.N.F. *Caracterização geotécnica da falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul - RN considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformado e cimentado artificialmente*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.
- SILVA, W.S. *Estudo da Dinâmica Superficial e Geotécnico das Falésias do Município de Tibau do Sul – Litoral Oriental do RN*. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.
- SOUSA, R. DE A. *Resistência e Compressibilidade de Solos da Formação Barreiras da Região de Natal/RN*. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.