PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DOS SEDIMENTOS DA FORMAÇÃO BARREIRAS NO LITORAL DO RIO GRANDE DO NORTE - BRASIL

Geotechnical properties of sediments of the Barreiras Formation in Rio Grande do Norte - Brazil

Olavo Francisco dos Santos Júnior* Roberto Quental Coutinho** Ricardo Nascimento Flores Severo***

RESUMO – A Formação Barreiras é uma unidade geológica de natureza sedimentar que aflora em uma faixa ao longo de aproximadamente 4000 km no litoral Brasileiro. Na Região Nordeste a Formação Barreiras dá suporte a várias cidades e suas infraestruras. Este trabalho teve como objetivo revisar, sumarizar e interpretar de forma conjunta os vários trabalhos desenvolvidos sobre os aspectos geotécnicos da Formação Barreiras no estado do Rio Grande do Norte. Foram analisados os aspectos de constituição mineralógica, caracterização geotécnica e propriedades mecânicas dos sedimentos. A Formação Barreiras apresenta perfís com sedimentos areno-argilosos e areno-siltosos laterizados na superfície, seguidos de uma camada com cimentação ferruginosa (lateritas) e na parte inferior apresentam-se mais argilosos. A permeabilidade é baixa, o material da base é colapsível e todo o perfíl apresenta-se com baixo grau de saturação. A resistência e o comportamento tensão-deformação são fortemente influenciados pela cimentação entre as partículas e pela sucção.

SYNOPSIS – The Barreiras Formation is a geological unit of sedimentary nature that outcrops in a strip along approximately 4000 km in the Brazilian coast. In the Northeast Region, the Barreiras Formation supports multiple cities and their infrastructure. This study aimed to jointly review, summarize and interpret the various works done on the geotechnical aspects of Barreiras in the state of Rio Grande do Norte. Aspects of mineral composition, geotechnical characterization and mechanical properties of the sediments were analysed. The Barreiras Formation presents profiles with sandy lateritic sediments on the surface, followed by a layer of ferruginous cementation (laterites) and clayey sediment layers on the base. The permeability is low, the base material is collapsible and the whole profile presents low degree of saturation. Strength and stress-strain behaviour are strongly influenced by cementation between particles and by suction.

PALAVRAS CHAVE - Formação Barreiras, solos lateríticos, propriedades geotécnicas.

1 – INTRODUÇÃO

A região costeira do nordeste do Brasil vem passando por um elevado crescimento econômico em função da implantação de indústrias, refinarias, parques para geração de energia eólica, implantação de fazendas de carcinicultura e empreendimentos turísticos. Isso tem levado a

 ^{*} Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
– UFRN. E-mail: olavo@ct.ufrn.br

^{**} Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. E-mail: rqc@ufpe.br

^{***} Professor Associado, Departamento de Construção Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN. E-mail: ricardo.severo@ifrn.edu.br

construção e ampliação da infraestrutura de portos, rodovias e aeroportos. Além disso, verifica-se a presença de grandes centros urbanos com necessidade crescente de implantação de edifícios e obras de mobilidade urbana como pontes, viadutos, dentre outros. Todos esses elementos demandam o conhecimento das propriedades geotécnicas tanto dos locais onde serão assentados como em alguns casos dos materiais terrosos que serão utilizados na construção, tendo em vista que as propriedades geotécnicas são importantes para projetos de fundações, análise de estabilidade de taludes e na seleção de materiais para a construção de aterros e camadas de pavimentos.

No estado do Rio Grande do Norte – RN (Fig. 1), a zona costeira oriental, na qual encontrase a região objeto do presente estudo, apresenta algumas feições morfológicas típicas como dunas, falésias, tabuleiros e planícies flúvio-marinhas. A maior parte da infraestrutura e das cidades presentes na região está assentada na unidade geológica denominada Formação Barreiras. Trata-se de um material de origem sedimentar que tem merecido a atenção de pesquisas geológicas desde o início do século XX.

Vários trabalhos acadêmicos têm sido desenvolvidos com vistas ao estudo de problemas geotécnicos na região, especialmente voltados para as questões ambientais (Pereira, 2004), da estabilidade de falésias (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011 e Souza Jr., 2013) e da caracterização do solo como material para construção (Chaves, 1979; Cunha, 1992 e Pereira, 2012). O presente trabalho tem como objetivo sumarizar e interpretar de forma conjunta os estudos já realizados na Formação Barreiras com vistas a obtenção das suas propriedades geotécnicas.



Fig. 1 – Localização geográfica da área estudada.

2 – GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

2.1 – Aspectos geológicos e geomorfológicos regionais

A região costeira do Brasil é constituída por bacias sedimentares formadas antes da separação dos continentes da América do Sul e da África. Essas bacias foram inicalmente preenchidas por sedimentos no Mesozóico. Após a separação dos continentes ocorreu a deposição de sedimentos de idade Cenozóica. A Fig. 2 mostra a distribuição das bacias sedimentares da costa brasileira. No estado do Rio Grande do Norte estão presentes a Bacia Potiguar e a Bacia Paraíba-Pernambuco. A área de estudo está inserida nesta última.



Fig. 2 – Distribuição dos estratos Cenozóicos da margem continental brasileira (Rossetti *et al.*, 2013) e localização da área estudada.

A Fig. 3 mostra o mapa geomorfológico e geológico do litoral leste do RN elaborado por Diniz (2002). Próximo à linha de praia, ocorrem campos de dunas formados por sedimentos eólicos. Em alguns trechos verifica-se a presença de escarpas abruptas no terreno formadas pela ação erosiva do mar (falésias).

Adentrando ao continente o relevo é formado por tabuleiros, os quais são atravessados por rios com direção predominante SW-NE e de forma secundária na direção NW-SE. Esses rios correm em vales largos onde se desenvolvem planícies fluviais. Nas regiões próximas ao mar, associados aos sedimentos aluvionares ocorrem contribuições de origem marinha, formando a planície flúvio-marinha. Em alguns trechos do litoral os tabuleiros entram em contato com o mar formando as falésias, as quais se constituem nas bordas dos tabuleiros.

Em termos geológicos os tabuleiros correspondem a Formação Barreiras, uma importante unidade geológica da região costeira do Brasil. Trata-se de uma formação sedimentar de expressão continental, estendendo-se desde a Foz do Amazonas, por toda a região costeira norte e nordeste, até o Rio de Janeiro. Sobre a Formação Barreiras há importantes cidades e infraestrutura instalada.



Fig. 3 - Mapa geológico e geomorfológico do litoral oriental do RN (Diniz, 2002).

A Formação Barreiras consiste em uma cobertura sedimentar, com camadas intercaladas de argilitos, siltitos, arenitos, com diferentes teores de silte e argila e arenitos conglomeráticos. Ocorre com frequência a presença de camadas enrijecidas com cimentação ferruginosa. Os sedimentos da Formação Barreiras apresentam tonalidades com coloração viva e que variam desde vermelhas, amarelas até brancas. Os sedimentos da Formação Barreiras afloram nas falésias erodidas ao longo das praias, nas vertentes íngremes dos vales e em taludes de cortes de rodovias.

A idade da Formação Barreiras é motivo de discussão entre pesquisadores, principalmente em relação ao final da deposição. De acordo com Bezerra *et al.* (2001) trabalhos anteriores indicam que a idade varia de Mioceno a Plioceno. Estudos mais recentes sugerem que a parte inferior da Formação Barreiras data do Mioceno inferior a médio (Arai, 2006; Rossetti *et al.*, 2013).

De acordo com Mohriak (2003) a Formação Barreiras tem origem continental, formado principalmente em ambiente fluvial. Alheiros e Lima Filho (1991) revisaram a geologia da faixa costeira oriental do Nordeste do Brasil, entre as cidades de Natal e Recife. No trabalho observaram três fácies sedimentares: leques aluviais; sistema fluvial de canais entrelaçados e litorânea.

De acordo com Alheiros e Lima Filho (1991) a fácies de leques aluviais corresponde a areias grossas e conglomeráticas recobertas por pelitos com repetição vertical desse padrão, o que indica ciclos de deposição. Apresenta-se na forma de depósitos estratificados com cores fortes dependendo do teor e tipo de ferro presente.

A fácies de sistema fluvial de canais entrelaçados consiste de areias cremes quartzosas com grãos de feldspatos, formando camadas maciças. Essas camadas podem ser visualizadas nos cortes de estradas, onde apresentam-se bem estáveis no que diz respeito à erosão e ocorrência de deslizamentos. As areias sofreram intemperismo, resultando na segregação de argila e do óxido de ferro que são depositados na base das camadas. A deposição do óxido de ferro forma níveis endurecidos e impermeáveis que afetam o comportamento mecânico e hidráulico das encostas. Em alguns trechos as areias podem mostrar-se mais feldspáticas com coloração mais forte, variando de vermelho, amarelo a rôxo. Alheiros e Lima Filho (1991) destacam a ocorrência de pavimentos de seixos de quartzo subarredondados a subangulosos. Ocorrem ainda camadas silto-argilosas de pequena espessura resultante da deposição em planície de inundação. A presença de argila associada as camadas arenosas resulta da ação do intemperismo na decomposição dos feldspatos.

A fácies litorânea consiste de areias quartzosas com pouco feldspato, incoerentes, cores claras, granulometria fina a média, com boa seleção e grãos subarredondados a subangulosos. Intercalados com as areias ocorrem filmes argilosos, cor cinza esverdeados, e matéria orgânica a intervalos de 1 a 2 cm. De acordo com Alheiros e Lima Filho (1991) a fácies litorânea corresponde a uma deposição de sedimentos em lagunas e planícies de maré.

2.2 – Geologia da área estudada

Araújo *et al.* (2006) realizaram um estudo faciológico e interpretaram os sistemas de deposição dos sedimentos da Formação Barreiras em falésias inseridas na área de estudo do presente trabalho. Foram individualizadas três fácies principais, denominadas de Gt (conglomerática), St (arenosa) e Fl (argilosa).

A fácies Gt corresponde a conglomerados imersos em uma matriz arenosa, com estratificação cruzada acanalada. Os seixos consistem de quartzo, feldspatos e clastos de argila. Apresenta cimentação ferruginosa, o que confere a estas rochas uma cor avermelhada. A fácies St é formada por arenitos de textura média a grossa, de coloração amarelada, exibindo estratificação cruzada acanalada e subordinadamente tabular, com a presença esporádica de seixos dispersos. A fácies Fl compreende lamitos com diferentes proporções de argila, silte e areia mostrando coloração avermelhada, sendo a lama argilosa cimentada por óxido de ferro.

As associações de fácies descritas foram interpretadas como indicativas da deposição em um contexto fluvial, sendo as de granulação mais grossa relacionadas a depósitos de preenchimento de canais e as de textura mais fina, atribuídas a depósitos de planície de inundação.

A geologia da área objeto do estudo está representada no mapa geológico adaptado do trabalho de Alheiros e Lima Filho (1991), mostrado na Fig. 4. Os pontos de obtenção de informações também estão indicados na Fig. 4. As amostras coletadas nos pontos estudados foram obtidas em áreas de empréstimo para a execução de obras de terra, em taludes de cortes de rodovias e em falésias.Todas as amostras coletadas nos diversos trabalhos correspondem a fácies de sistema fluvial de canais entrelaçados.



Fig. 4 – Mapa geológico da área estudada (adaptado de Alheiros e Lima Filho,1991).

As Figs. 5, 6 e 7 mostram aspectos visuais dos sedimentos da Formação Barreiras. A Fig. 5 apresenta uma falésia no município de Tibau do Sul, na qual podem ser visualizadas seis camadas, compostas de material areno-argiloso. No topo ocorrem materiais avermelhados devido a processo de laterização provocado pelo intemperismo em ambiente tropical. Observar na parte intermediária a presença de uma camada escura, que apresenta forte cimentação ferruginosa. Na base ocorrem sedimentos com textura areno-argilosa de cor variegada, com aspecto heterogêneo e diferentes teores de cimentação ferruginosa.

A Fig. 6 apresenta fotos dos blocos indeformados utilizados no estudo de Severo (2005). As amostras foram retiradas do topo e da base das falésias de Tibau do Sul, outra à margem da rodovia BR 101, km 131, e um quarto bloco coletado à margem da rodovia RN 003, km 8, na localidade de Piau. O bloco denominado Topo – Falésia apresenta coloração avermelhada, bastante homogêneo, sem fissuras e com inscrustrações de grãos de quartzo e granulometria variada. Vale salientar que este é o mesmo bloco estudado por Silva (2003). O bloco Base – Falésia é de coloração esbranquiçada, apresentando nódulos vermelhos, sem fissuras. Este tem uma grande resistência ao destorroamento. O bloco Piau – RN 003 é bastante heterogêneo com coloração variegada, indo do amarelo ao vermelho escuro, passando por tons de marrom, apresentando fissuras variadas. Este se caracteriza pelo fácil destorroamento e por possuir nódulos de cimentação, com óxido de ferro, de coloração roxa, de grande resistência. Finalmente o bloco BR – 101, km 131, apresenta coloração variegada, uma maior resistência ao destorroamento quando comparado ao bloco Piau.



Fig. 5 – Falésia em Tibau do Sul (Severo, 2005).



Fig. 6 – Aspectos visuais dos blocos de amostras indeformadas (Severo, 2005).

A Fig. 7 apresenta características dos sedimentos presentes numa falésia em Baía Formosa (Souza Júnior, 2013). Ao longo de um trecho de aproximadamente 1,3 km, Souza Júnior (2013) destaca a predominância de dois tipos de materiais: o primeiro, no topo, consiste em uma areia argilosa de coloração avermelhada apresentando uma ligeira variação de tonalidade e heterogeneidade em alguns locais; já o segundo, na base, constitui-se de um material argiloso variegado (Fig. 7). Na parte intermediária da falésia observam-se camadas constituídas de materiais em estágios de cimentação diferenciados com destaque para camada cimentada de seixos.



Fig. 7 – Falésia em Baía Formosa (Souza Júnior, 2013).

3 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E GEOTÉCNICA DOS SEDIMENTOS DA FORMAÇÃO BARREIRAS

3.1 - Caracterização química e mineralógica

A caracterização química e mineralógica de amostras de sedimentos da Formação Barreiras foi realizada de forma detalhada por Chaves (1979). Foram analisadas amostras de três jazidas de material de empréstimo para a execução de obras de terra. No estudo, Chaves (1979) realizou análises de difração de raio-X, termogravimétricas e microscopia eletrônica de varredura. A descrição dos aspetos químicos e mineralógicos também foi feita por Severo (2011) e Pereira (2012).

No trabalho de Chaves (1979) as amostras foram separadas em duas frações de acordo com a dimensão das partículas. A fração "concreção" era formada por partículas com diâmetro superior a 9,5 mm. A fração "solo" consistia de partículas com diâmetro inferior a 9,5 mm.

Os resultados da difração de raios-X apresentaram caulinita como o argilo-mineral presente em todas as frações de solo e concreções. Observa-se também a presença de quartzo com diâmetro maior que 2 mícrons. Os minerais goetita e hematita também foram detectados (Chaves, 1979).

Os resultados mostraram que a fração "concreção" era formada pela aglomeração de partículas de quartzo cimentadas por uma matriz ferruginosa. No agente cimentante foram observadas as presenças de goetita, hematita e caulinita. Na fração "solo" foram observadas a presença de quartzo na fração areia e goetita e caulinita nas frações silte e argila. Alguns grãos de quartzo apresentam cimentação por óxidos de ferro, provavelmente uma mistura de goetita e hematita. De um modo geral, houve uma grande diferença entre o teor de ferro nas concreções e nos solos, admitindo-se que a acumulação dos óxidos de ferro é o principal requisito de formação de concreções (Chaves, 1979).

São considerados solos lateríticos aqueles em que a fração com diâmetro menor que 2μ apresentar relação molecular K_r (sílica/sesquióxido) menor que 2 (Winterkorn e Fang, 1975). Nas análises realizadas por Chaves (1977) em todas as amostras a fração argila (< 2μ) apresentou K_r<2, de forma que o material pode ser classificado como laterítico.

Severo (2011) analisou um perfil da Formação Barreiras através da coleta de sedimentos em quatro camadas que compõem o perfil geotécnico da falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul – RN. As Amostras foram denomindadas de camada de topo - B1, camadas do meio - B2, camada fortemente cimentada (localizada à profundidade em torno de quatorze metros abaixo do topo da falésia) e camada da base - B3. No Quadro 1 é apresentado um resumo dos principais compostos químicos que compõem as camadas de onde foram retirados os blocos indeformados e a camada fortemente cimentada.

| AMOSTRA | SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | CaO (%) | Outros (%) | Perda fogo (%) | Kr | Ki |
|------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|------------|----------------|------|------|
| Topo - B1 | 41,8 | 24,0 | 13,5 | 0,4 | 4,9 | 15,4 | 2,18 | 2,96 |
| Meio - B2 | 37,1 | 19,4 | 25,5 | 0,2 | 4,7 | 13,1 | 1,77 | 3,25 |
| Camada cimentada | 30,1 | 15,2 | 39,7 | 0,8 | 2,7 | 11,5 | 1,26 | 3,37 |
| Base - B3 | 40,0 | 22,4 | 18,3 | 0,2 | 6,4 | 12,7 | 1,99 | 3,04 |

Quadro 1 – Resumo dos principais compostos químicos presentes nas amostras dos blocos e da camada fortemente cimentada (Severo, 2011).

Observa-se que os principais compostos químicos presentes nas amostras dos solos das quatro camadas analisadas são o óxido de silício (quartzo), óxido de alumínio e óxido de ferro. Observa-se a presença, em maior ou menor grau, de óxido de ferro, com sua ação cimentante sobre os demais compostos. A camada fortemente cimentada apresenta o óxido de ferro em maior proporção, seguida da camada do meio, base e em menor concentração na camada de topo da falésia. Nesse caso as camadas do meio, fortemente cimentadas, e base são formadas por solos lateríticos.

Severo (2011) também realizou análises mineralógicas morfoscópicas da fração graúda dos solos dos blocos e da camada fortemente cimentada, bem como a análise mineralógica por difração de raio X da fração fina desses solos. Sob o ponto de vista da análise mineralógica morfoscópica, as quatro camadas da falésia apresentam pedregulho e areia quartzosa, cimentados em maior ou menor grau com óxido de ferro, resultando nas concreções lateríticas. No caso da camada fortemente cimentada, essas concreções formam uma massa coesa única de aspecto rochoso.

A análise mineralógica foi realizada por difratograma de raio X. A mineralogia do solo está diretamente relacionada com a sua composição química e a combinação dos vários elementos forma uma estrutura cristalina dos minerais e argilominerais. A análise da mineralogia foi realizada nas frações argila e silte. As análises foram realizadas nas amostras correspondentes aos blocos B1, B2, B3 e na camada fortemente cimentada. Os solos das quatro camadas analisadas apresentaram os mesmos minerais: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ - Hidróxido de silicato de alumínio (Caulinita); $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ - Hidróxido de silicato de alumínio (Pirofilita) e SiO₂ - Óxido de silício (Quartzo).

3.2 - Caracterização geotécnica

Ensaios de caracterização geotécnica foram realizados nos trabalhos de Silva (2003), Severo (2005), Pereira (2004), Severo (2011), Pereira (2012) e Souza Jr. (2013). Em todos os trabalhos os ensaios de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade foram realizados seguindo a metodologia definida nas normas brasileiras. Os ensaios de granulometria por sedimentação foram realizados com uso do defloculante e sem o uso do defloculante.

As Figs. 8 e 9 apresentam os gráficos de plasticidade e de atividade da fração argilosa. De maneira geral os sedimentos apresentam granulometria arenosa com variados teores de finos. Ocorrem ainda a presença de materiais argilosos e camadas conglomeráticas. Os finos apresentam



Fig. 8 – Gráfico de plasticidade.

baixa a média plasticidade, o que fica evidenciado no índice de atividade da fração argilosa mostrado na Fig. 9. Os resultados obtidos na caracterização geotécnica estão compatíveis com a mineralogia, uma vez que a caulinita e os minerais ricos em ferro apresentam baixa atividade.

De um total de 111 amostras ensaiadas, 32% foram classificadas como SC (areia argilosa), 23% como SM (areia siltosa), 15% como SM-SC, 18% como CL (argila de baixa plasticidade), 7% como ML (silte de baixa plasticidade) e 5% como GC (pedregulho argiloso). Em todas as amostras o limite de liquidez foi sempre inferior a 50% e o índice de plasticidade apresentou valor máximo de 21,3%.



Fig. 9 – Atividade da fração argilosa.

3.3 – Ensaios de imersão

Os ensaios de imersão total (*Crumb Test*) e parcial são utilizados para avaliar o potencial de dispersividade do solo. Os ensaios de imersão foram realizados conforme descrito por Head (1985). Ao todo foram realizados dezoito ensaios. Severo (2005) realizou cinco ensaios com amostras provenientes do topo das falésias, cinco com amostras oriundas da base e duas com material proveniente da BR 101. Severo (2011) realizou seis ensaios, dois com amostras de topo, dois com amostras do meio e dois da base da Falésia da Ponta do Pirambu localizada no município de Tibau do Sul – RN.

Conforme o tipo de desintegração, Head (1985) classifica os solos em quatro graus: grau 1 - não reagente, grau 2 - reação leve, grau 3 - reação moderada e grau 4 - reação forte. Os graus 1 e 2 indicam um solo não dispersivo e os graus 3 e 4 indicam um solo dispersivo.

De acordo com Severo (2005) em apenas uma das amostras o material proveniente da base praticamente se desintegrou e isso se deu em menos de cinco minutos (grau 4). As demais amostras

da base que possuem uma grande quantidade de nódulos avermelhados apresentaram uma característica diferenciada: a parte mais clara da amostra se soltava primeiro e isto ocorria na forma de escamas ou pastilhas. Já o material mais avermelhado se soltava em partículas com velocidade bem inferior. Após 24 horas em repouso, o material mais claro ficava quase que totalmente desagregado. Já o mais avermelhado ainda apresentava-se de forma aglutinada. A dispersividade deste material pode ser considerada pequena (grau 2), embora deixe a água um pouco turva e forme um anel de material em suspensão na superfície do líquido. O material mais claro era o maior contribuinte para a formação do anel.

Já o material proveniente do topo possui uma tonalidade avermelhada e oferece, em relação ao material da base, uma grande resistência à liberação das partículas quando imerso. O mesmo ocorre com o material retirado no km 131 da BR 101, sendo classificados como de grau 2.

Os resultados obtidos por Severo (2011) em seis amostras coletadas na falésia da Ponta do Pirambu no município de Tibau do Sul mostraram que a dispersividade foi classificada como de grau 1 para todas as amostras analisadas.

Portanto os resultados mostraram claramente que o material analisado apresentou um comportamento não dispersivo, exceção feita a uma das amostras da base analisada por Severo (2005).

3.4 - Ensaios de resistência a compressão simples

Silva (2003) realizou ensaios de compressão não confinada em amostras indeformadas obtidas em falésias no município de Tibau do Sul. Foram realizados dezessete ensaios, sendo quatro em amostra coletadas do material presente na base da falésia e treze com o material do topo. Os resultados obtidos no material do topo e da base estão apresentados nos Quadros 2 e 3, respectivamente.

| Amostra | γ (kN/m³) | e | S (%) | RCS (kPa) |
|---------|-----------|------|-------|-----------|
| 01 | 15,62 | 0,72 | 4,72 | 393 |
| 02 | 16,03 | 0,67 | 5,02 | 314 |
| 03 | 15,97 | 0,68 | 4,97 | 380 |
| 04 | 15,94 | 0,68 | 4,95 | 393 |
| 05 | 16,23 | 0,65 | 5,18 | 550 |
| 06 | 16,01 | 0,68 | 5,01 | 336 |
| 07 | 15,98 | 0,68 | 4,98 | 808 |
| 08 | 16,16 | 0,66 | 5,13 | 619 |
| 09 | 16,22 | 0,65 | 5,17 | 610 |
| 10 | 15,80 | 0,70 | 4,85 | 494 |
| 11 | 15,57 | 0,72 | 4,48 | 380 |
| 12 | 15,81 | 0,70 | 5,09 | 520 |
| 13 | 16,92 | 0,59 | 5,85 | 617 |

Quadro 2 – Características iniciais do solo e resistência a compressão simples (RCS) do material do topo da falésia (Silva, 2003).

De acordo com Collins e Sitar (2009), com base em estudos sobre falésias em areias cimentadas, os materiais podem ser classificados de acordo com o grau de cimentação como: fracamente, moderadamente ou fortemente cimentados. O parâmetro proposto para a classificação foi à resistência a compressão simples (RCS). Os materiais fracamente cimentados apresentam RCS inferior a 100 kPa; os moderadamente cimentados têm RCS entre 100 e 400 kPa e os fortemente cimentados possuem RCS superior a 400 kPa.

| Amostra | γ (kN/m³) | e | S (%) | RCS (kPa) |
|---------|-----------|------|-------|-----------|
| 01 | 19,40 | 0,38 | 5,47 | 605 |
| 02 | 19,00 | 0,40 | 4,54 | 610 |
| 03 | 19,78 | 0,35 | 6,55 | 936 |
| 04 | 19,20 | 0,39 | 5,38 | 611 |

Quadro 3 – Características iniciais do solo e resistência a compressão simples (RCS) do material da base da falésia (Silva, 2003).

A análise do Quadro 2 mostra que o material do topo das falésias apresenta-se bastante heterogêneo, no que diz respeito a resistência a compressão simples, embora visualmente pareça homogêneo. As amostras apresentam valor médio de 493 kPa, máximo de 808 kPa, mínimo de 314 kPa e desvio padrão de 144 kPa. Verifica-se também que não há relação direta entre os índices de vazios e a resistência, embora a variação do índice de vazios seja relativamente pequena. Essa variabilidade da resistência pode ser atribuída a diferentes graus de cimentação entre as partículas, nem sempre visível a olho nu. Utilizando-se a classificação proposta por Collins e Sitar (2009) verifica-se que o material do topo da falésia apresenta 54% das amostras como sendo fortemente cimentadas e 46% como moderadamente cimentadas.

A partir dos valores apresentados no Quadro 3, vê-se que as amostras provenientes da base apresentaram tensão de ruptura variando de 605 kN/m² a 936 kN/m², com valor médio de 691 kN/m² e desvio padrão de 163 kN/m². De acordo com a classificação proposta por Collins e Sitar (2009) o material é classificado como fortemente cimentado.

Os corpos de prova que possuíam tensão de ruptura acima da média observada romperam de forma brusca, se dividindo em vários fragmentos. Os demais corpos de prova apresentavam planos de ruptura bem definidos, que se iniciavam nas extremidades e percorriam os corpos de prova longitudinalmente.

3.5 – Ensaios de compressão edométrica

Ensaios de compressão confinada foram realizados por Silva (2003). Ao todo foram realizados cinco ensaios edométricos, sendo dois em solo proveniente da base e três em solo proveniente do topo das falésias. Os ensaios foram iniciados com teor de umidade natural até um dado carregamento, quando as amostras foram inundadas e observadas as deformações decorrentes da inundação. Segundo Vargas (1978), deformações superiores a 2% indicam que o solo é colapsível.

Os solos provenientes do topo apresentaram deformações de, no máximo, 0,5% para o carregamento de 50 kPa e, no máximo, 1,5% para o carregamento de 200 kPa. Assim, são classificados como não colapsíveis. As amostras provenientes da base da falésia quando inundadas no estágio de carga de 200 kPa apresentaram deformações da ordem de 4%. Dessa forma, os solos provenientes da base podem ser classificados como colapsíveis.

3.6 – Permeabilidade

3.6.1 – Resultados da permeabilidade em laboratório com amostra indeformada

Foram realizados sete ensaios de permeabilidade em laboratório com solos da Formação Barreiras, quatro apresentados em Santos Jr. *et al.* (2008) e três para o presente trabalho com blocos coletados na região de Tibau do Sul - RN. Os ensaios de permeabilidade foram realizados conforme a NBR 13292/1995 - "Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante" e NBR-14545/2000 – "Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável".

Para a realização do ensaio de permeabilidade em laboratório, foram moldados corpos de prova de forma cilíndrica com aproximadamente 7 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Posteriormente, colocava-se no permeâmetro com areia média, bentonita e parafina, de modo a se obter a impermeabilização requerida para o ensaio. Os ensaios foram realizados com carga constante e variável, mas devido à baixa permeabilidade, só os ensaios com carga variável foram considerados.

Os corpos de prova relativos aos estudos de Severo (2005) e apresentados por Santos Jr. *et al.* (2008) foram moldados a partir dos blocos indeformados mostrados na Fig. 6. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 4, onde indicam-se a localização das amostras, o coeficiente de permeabilidade, o índice de plasticidade e o tipo de solo conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos.

A análise do Quadro 4 mostra que os coeficientes de permeabilidade variam entre 6.5×10^{-5} m/s e 8.2×10^{-9} m/s. A amostra de Piau – RN 003 apresentou resultado atípico em se tratando de solos argilosos. Na análise granulométrica verificou-se que esse solo possui 61.8% de argila. A permeabilidade alta, para um solo argiloso, pode ser atribuída à existência de microfissuras no seu interior.

De todas as amostras, observou-se que no topo o material é mais permeável que na base, o que deve facilitar a sua saturação por infiltração. De maneira geral, os solos com índices de plasticidade mais elevados apresentam menores coeficientes de permeabilidade.

Conforme Ortigão (1993), o solo é considerado impermeável ou com drenagem impedida, quando apresenta permeabilidade muito baixa, com k variando entre 10⁻⁷ e 10⁻⁹ m/s, que é o caso de certos tipos de solos argilosos.

| AMOSTRA | k (m/s) | IP (%) | CLASSIFICAÇÃO (SUCS) |
|-----------------|------------------------|--------|------------------------------|
| Topo - Falésia | 6,3 × 10 ⁻⁶ | 7,3 | CL (Santos Jr. et al., 2008) |
| Base - Falésia | 8,2 × 10-9 | 16,3 | CL (Santos Jr. et al., 2008) |
| Piau - RN 003 | 6,5 × 10-5 | 6,3 | CL (Santos Jr. et al., 2008) |
| BR 101 - km 131 | 1,5 × 10 ⁻⁸ | 18,6 | CL (Santos Jr. et al., 2008) |
| Topo - Falésia | 2,3 × 10-7 | 21,4 | MH (Presente trabalho) |
| Meio - Falésia | 1,3 × 10-7 | 16,6 | SC (Presente trabalho) |
| Base - Falésia | 1,0 × 10-7 | 36,6 | SC (Presente trabalho) |

Quadro 4 - Coeficiente de permeabilidade (k) em laboratório.

3.6.2 – Resultados da permeabilidade em campo infiltração

Foram realizados dois ensaios de permeabilidade *in situ* com solos da Formação Barreiras, do alto das falésias de Pipa, no topo dos trechos norte e central, com solos no seu estado natural do tipo CL e SM, de coloração avermelhada e acinzentada, respectivamente. Os valores dos coeficientes de permeabilidade *in situ*, bem como sua localização são apresentados no Quadro 5.

Os ensaios de permeabilidade em campo (infiltração) foram realizados segundo o procedimento indicado no Boletim 04, de junho de 1996, da ABGE. Para realização do ensaio de infiltração, inicialmente escava-se a trado um furo, que pode ser revestido ou não. O furo deve ter o diâmetro correspondente ao trado e ter a orientação vertical. Foram escavados dois furos um com 103 cm e outro com 50 cm de profundidade, em locais diferentes. Em seguida encheram-se os furos de água até à boca, tomando-se esse instante como tempo zero. O nível de água no furo deve ser mantido constante, de modo que se quantifique o volume de água introduzido durante certo intervalo de tempo (vazão). O coeficiente de infiltração final é obtido a partir do momento em que as leituras de vazão se tornam constantes.

| AMOSTRA | k (m/s) | CLASS. (SUCS) | |
|------------------------|-------------------------|---------------|--|
| Topo-Falésia (Norte) | 6,60 × 10 ⁻⁸ | CL | |
| Topo-Falésia (Central) | $1,75 \times 10^{-6}$ | SM | |

Quadro 5 – Coeficiente de permeabilidade em campo (Severo, 2005).

Os resultados dos ensaios de permeabilidade em campo fornecem resultados diferentes daqueles obtidos em laboratório. Observou-se que o solo mais argiloso (CL) apresentou um coeficiente de permeabilidade em campo bem menor do que o solo areno-siltoso.

3.7 - Resistência ao cisalhamento

As propriedades de resistência ao cisalhamento dos sedimentos da Formação Barreiras foram obtidas através de ensaios de cisalhamento direto por Silva (2003), Severo (2005) e Souza Jr. (2013). Quatro áreas foram estudadas, das quais duas em falésias (Tibau do Sul e Baía Formosa), um talude de corte na rodovia BR-101, no km 131, e em uma área de empréstimo, no distrito de Piau.

3.7.1 – Comportamento tensão cisalhante × deslocamento e deformação volumétrica × deslocamento

Na área de Tibau do Sul, Severo (2005) coletou quatro blocos indeformados apresentados na Fig. 6. Para analisar o efeito da perda de sucção no solo foram realizados ensaios nas condições naturais (amostras com teor de umidade existente no momento da coleta) e no estado inundado, para corpos de provas moldados a partir das amostras indeformadas. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto com tensões normais em torno de 50, 100, 200 e 400 kPa.

No Quadro 6, para efeito de exemplificação, apresentam-se as condições iniciais e de ruptura dos corpos de prova ensaiados no estado inundado referente a duas séries de ensaios com o material do bloco Topo - Falésias de Tibau do Sul. As Figs. 10 e 11 mostram as tensões cisalhantes e as deformações volumétricas, respectivamente, que ocorreram no desenvolvimento dos ensaios das amostras do topo da falésia, na condição inundada (Silva, 2003).

De acordo com o Quadro 6 apresentado em Severo (2005) o solo apresentou índices de vazios variando de 0,677 a 0,776, com valor médio de 0,731. As amostras encontravam-se não saturadas, com teores de umidade muito baixos.

A análise dos resultados apresentados nas Figs. 10 e 11 permite identificar três tipos de comportamento como resposta a solicitações no ensaio de cisalhamento direto. O primeiro, denominado de TIPO A, é semelhante a condição de um solo sobre adensado, com um pico de resistência bem definido, que ocorre a pequenas deformações (inferiores a 3%), seguido de amolecimento até a resistência residual. O segundo, denominado TIPO B, consiste no aumento progressivo da tensão cisalhante até o valor de ruptura, permanecendo constante a partir daí. O valor máximo de resistência ocorre para deslocamentos superiores a 4%, de forma semelhante ao comportamento de solos normalmente adensados.

Em termos de deformações volumétricas, o comportamento TIPO A está associado à compressão seguida de expansão, enquanto que no TIPO B, o comportamento é esencialmente compressivo. Os ensaios com tensões normais em torno de 50 e 100 kPa apresentados nas Figs. 10 e 11 mostram um comportamento TIPO A, enquanto que os ensaios com tensão normal de 400 kPa apresentam o comportamento TIPO B.

| СР | Condições iniciais | | | | | Condições na ruptura | | |
|----|--------------------|------------------------|---------------------------------|-------|-------|----------------------|---------|---------|
| | w (%) | γ (kN/m ³) | $\gamma_{\rm d}~({\rm kN/m^3})$ | e | S (%) | w (%) | σ (kPa) | τ (kPa) |
| 01 | 1,57 | 15,65 | 15,41 | 0,720 | 5,77 | 27,48 | 52,0 | 70,0 |
| 02 | 1,66 | 15,62 | 15,37 | 0,725 | 6,08 | 25,33 | 105,0 | 110,0 |
| 03 | 1,37 | 15,13 | 14,92 | 0,776 | 4,69 | 27,61 | 212,0 | 150,0 |
| 04 | 1,89 | 15,55 | 15,26 | 0,737 | 6,80 | 25,68 | 420,0 | 262,0 |
| 05 | 1,80 | 15,74 | 15,46 | 0,714 | 6,67 | 29,90 | 54,0 | 71,0 |
| 06 | 1,75 | 15,27 | 15,00 | 0,766 | 6,07 | 26,17 | 104,0 | 125,0 |
| 07 | 1,45 | 15,50 | 15,28 | 0,735 | 5,22 | 26,68 | 212,0 | 163,0 |
| 08 | 1,48 | 16,04 | 15,80 | 0,677 | 5,81 | 25,51 | 423,0 | 280,0 |

Quadro 6 – Condições iniciais e de ruptura dos corpos de prova (Severo, 2005).

O terceiro tipo de comportamento (TIPO C) é uma situação intermediária entre os dois mencionados acima. Este tipo de comportamento pode ser observado nas amostras submetidas a tensões normais de 200 kPa.

Pelas análises as amostras apresentam o comportamento variável com o nível de tensão normal, semelhante a um solo com tensão de pré-adensamento em torno de 200 kPa. Como não há registro geológico de pré-adensamento desse material, esse efeito pode ser atribuído a cimentação ferruginosa identificada nos sedimentos da Formação Barreiras por Chaves (1979) e Severo (2011).

No Quadro 7 é apresentado de forma qualitativa o comportamento dos solos em que foram realizados os ensaios. Observa-se novamente que o tipo de comportamento depende do nível de tensão normal. O Quadro 7 mostra ainda que a sucção também influencia no tipo de comportamento. De maneira geral, as amostras ensaiadas no teor de umidade natural passam a apresentar o comportamento tipo C sob níveis de tensão normal mais elevados que as amostras inundadas. As amostras ensaiadas no teor de umidade natural não apresentaram o comportamento Tipo B. Essas observações permitem concluir que o efeito da sucção é de tornar o material mais rígido.



Fig. 10 – Curvas tensão cisalhante *versus* deformação transversal, amostras provenientes do topo (Silva, 2003).



Fig. 11 – Curvas deformação vertical específica *versus* deformação transversal, amostras provenientes do topo (Silva, 2003).

| Sala | Tensão normal | Índice de vazios | Tipo de comportamento | | |
|----------------|---------------|------------------|-----------------------|----------|--|
| 5010 | (kPa) | inicial | Umidade natural | Inundado | |
| | 50 | | А | А | |
| Topo Falósia | 100 | 0.677 a 0.781 | А | А | |
| Topo – Patesia | 200 | 0,077 a 0,781 | А | С | |
| | 400 | | С | В | |
| | 50 | | А | А | |
| Paga Falósia | 100 | 0.252 0.0.476 | А | А | |
| Base – Palesia | 200 | 0,552 a 0,470 | А | С | |
| | 400 | | С | В | |
| | 50 | | А | А | |
| Diau | 100 | 0 670 2 0 737 | А | С | |
| 1 lau | 200 | 0,070 a 0,757 | А | С | |
| | 400 | | С | С | |
| BR 101 | 50 | | А | А | |
| | 100 | 0 535 2 0 614 | А | А | |
| | 200 | 0,555 a 0,014 | А | А | |
| | 400 | | А | С | |

Quadro 7 - Comportamento qualitativo dos solos.

3.7.2 – Parâmetros de resistência

Severo (2005) realizou ensaios de cisalhamento direto visando obter os parâmetros de resistência dos solos. Na umidade natural, foram rompidos vinte corpos de prova (CPs), em séries de quatro cisalhamentos, com os quatro blocos coletados. Foram realizados ensaios com tensões normais em torno de 50, 100, 200 e 400 kPa, sendo duas séries de quatro com o bloco do Topo da falésia, uma série de quatro com o bloco da Base, uma série com o bloco de Piau e outra com o bloco da BR 101. Os ensaios no estado inundado foram em número de dezoito, quatro com CPs provenientes do Bloco de Piau e quatorze com CPs do Bloco da BR 101, onde, devido à grande dispersão dos resultados, foi necessária a realização de ensaios adicionais com tensões normais de 600 e 800 kPa, além das tensões acima citadas.

Silva (2003) realizou dezesseis ensaios de cisalhamento direto no estado inundado com as amostras dos Blocos Topo - Falésia e Base – Falésia, sendo duas série de quatro para cada bloco com tensões normais em torno de 50, 100, 200 e 400 kPa.

Para efeito de exemplificação das envoltórias obtidas, apresenta-se o gráfico das duas séries de ensaios realizados com o solo do Bloco Topo - Falésia na condição inundada (Fig. 12). Os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para os materiais estudados estão mostrados no Quadro 8. Para os solos apresentados, observa-se uma redução significativa na coesão quando se compara as condições de ensaios na umidade natural e inundadas, enquanto o ângulo de atrito mantem-se com a mesma ordem de grandeza com pequenas alterações.

Para aqueles blocos em que foram realizadas duas séries de ensaios na condição inundada ou na condição de umidade natural, os parâmetros de resistência desses solos apresentados no Quadro 8 são uma média dos parâmentros obtidos nas duas séries de ensaios em cada condição executada para o respectivo bloco.



Fig. 12 – Envoltórias de resistência Bloco Topo – Falésia na condição inundada.

| Solo | Parâmetros | Umidade Natural | Inundado | Fonte | |
|--------------------------------|------------|-----------------|----------|------------------------------------|--|
| Topo – Falésia | φ (°) | 28 | 28 | Santos Ir <i>at al.</i> (2008) | |
| Tibau do Sul | c (kPa) | 233,0 | 50,6 | - Santos JI. <i>et ut</i> . (2008) | |
| Base – Falésia | φ (°) | 28 | 27 | Santas In et al. (2008) | |
| Tibau do Sul | c (kPa) | 384,1 | 45,4 | - Santos J1. <i>et ut</i> . (2008) | |
| Piau - RN 003 | φ (°) | 32 | 30 | Santas Ir at al. (2008) | |
| | c (kPa) | 396,6 | 95,5 | Santos JI. <i>et ul</i> . (2008) | |
| DD 101 Jam 121 | φ (°) | 27 | 26 | | |
| BK 101 - KIII 151 | c (kPa) | 259,3 | 109,7 | Santos JI. <i>el ul</i> . (2008) | |
| Topo – Falésia | φ (°) | - | 29,5 | G L (2012) | |
| Baía Formosa | c (kPa) | - | 16,9 | - Souza JI. (2013) | |
| Base – Falésia Baía Formosa | φ (°) | - | 33,6 | Sauga Ir. (2012) | |
| | c (kPa) | - | 59,9 | 50uza JI. (2015) | |

Quadro 8 - Parâmetros de resistência dos sedimentos da Formação Barreiras.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou em conjunto uma série de trabalhos sobre os aspectos geotécnicos da Formação Barreiras, no estado do Rio Grande do Norte (RN), no Nordeste do Brasil. A Formação Barreiras é constituída por camadas de sedimentos predominantemente arenosos, com diversos teores de finos (silte e argila). Ocorrem ainda níveis conglomeráticos na parte intermediária de falésias ao longo do litoral oriental do RN. As camadas apresentam cores vivas, variando do vermelho, amarelo e branco, dependendo dos teores minerais que formam os sedimentos.

A observação de afloramentos da Formação Barreiras em falésias em Tibau do Sul e Baía Formosa permitiu identificar o seguinte padrão para os sedimentos. As camadas de topo (superiores), predominantemente arenosas, apresentam colorações avermelhada e alaranjada. Na porção intermediária as falésias normalmente apresentam níveis com cimentação ferruginosa (predominantemente por óxido de ferro). Em alguns trechos os níveis cimentados estão associados a presença de pedregulhos formando conglomerados. A cimentação ferruginosa forma assim, uma camada de laterita que incorpora grãos de areia grossa e pedregulhos. Abaixo da camada laterítica, base da falésia, ocorrem camadas com maiores teores de argila e com coloração variegada (branco com nódulos amarelos e vermelhos).

Em termos de minerais, as partículas das frações areia e pedregulho são constituídas de quartzo, as quais apresentam incrustações de minerais ricos em ferro. A fração fina é constituida por caulinita, goetita e hematita. As concreções presentes na camada intermediária e em alguns pontos na camada inferior são formadas por goetita e hematita. Em função das características mineralógicas os materiais estudados foram classificados como lateríticos.

Ensaios de caracterização mostraram que os sedimentos da Formação Barreiras apresentam plasticidade e atividade baixas, o que é compatível com a natureza mineralógica dos materiais. A permeabilidade é baixa, exceto quando ocorrem descontinuidades que condicionam o fluxo. Os solos da Formação Barreiras em geral apresentam um comportamento não dispersivo.

Ensaios de compressão unidimensional mostraram que o material do topo é não colapsível e que o da base é sujeito a colapso quando inundado em níveis de tensão de 200 kPa. A resistência à compressão simples mostrou um resultado muito heterogêneo, tanto para o material do topo como para o da base da falésia em Tibau do Sul. De acordo com a classificação de Collins e Sitar (2009), o material da base foi classificado como fortemente cimentado (RCS > 400 kPa), enquanto que o do topo apresentou-se dividido entre fortemente cimentado e moderadamente cimentado (RCS entre 100 e 400 kPa).

A partir dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto foi possível identificar três tipos de comportamento como resposta a solicitações impostas. O primeiro, denominado de TIPO A, é semelhante a condição de um solo sobre adensado, com um pico de resistência bem definido, que ocorre a pequenas deformações seguido de amolecimento até a resistência residual. O segundo, denominado TIPO B, consiste no aumento progressivo da tensão cisalhante até o valor de ruptura, permanecendo constante a partir daí. O terceiro tipo de comportamento (TIPO C) é uma situação intermediária entre os dois mencionados acima. As amostras inundadas apresentaram o comportamento Tipo A para baixos níveis de tensão normal (50 e 100 kPa), comportamento Tipo C para tensões normais variando de 200 a 400 kPa e o Tipo B para as tensões mais elevadas (400 kPa). Como não há registro de pré-adensamento esse tipo de comportamento foi atribuído a efeito de cimentação entre as partículas. As amostras ensaiadas no teor de umidade natural, mostraram comportamento similar, exceto que os valores de tensão normal da mudança de comportamento são mais elevados, o que mostra que a sucção torna o material mais rígido.

Os ensaios de resistência ao cisalhamento mostraram que a sucção exerce forte influência no comportamento dos sedimentos. Ocorre significativa perda de coesão quando se comparam os

resultados de ensaios realizados no teor de umidade em que as amostras se encontram no campo (muito baixos) e aqueles executados com amostra saturada. Por outro lado, o ângulo de atrito não sofreu essa influência. Amostras inundadas e não inundadas apresentaram valores da mesma ordem de grandeza para o ângulo de atrito.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil, através do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro (Processo nº 167670/2013-1) para a realização desse trabalho.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alheiros, M.M.; Lima Filho, M.F. (1991). A Formação Barreiras. Revisão geológica da Faixa Sedimentar Costeira de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. Estudos Geológicos (Série B Estudos e Pesquisas), v. 10, pp. 77-88.
- Arai, M. (2006). A Grande Elevação Eustática do Mioceno e sua Influência na Origem do Grupo Barreiras. Revista do Instituto de Geociências – USP, 6, n. 2, pp. 1-6.
- Araújo, V.D.; Reyes-Peres, Y.A.; Lima, R.O.; Pelosi, A.P.; Córdoba, V.C.; Lima-Filho, F.P. (2006). Fácies e Sistema Deposicional da Formação Barreiras na Região da Barreira do Inferno, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte. Revista do Instituto de Geociências – USP, 6, n. 2, pp. 43-49.
- Bezerra, F.H.R.; Amaro, V.E.; Vita-Finze, C.; Saadi, A. (2001). *Pliocene-Quaternary Fault Control Sedimentation and Coastal Plain Morphology in NE Brazil*. Journal of South American Earth Science, 14, pp. 61-75.
- Chaves, L.F.M. (1979). Propriedades Químicas e Mineralógicas de Três Solos Vermelhos Tropicais do Estado do Rio Grande do Norte. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.
- Collins, B.D.; Sitar, N. (2009). *Geotechnical Properties of Cemented Sands in Steep Slopes*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, No. 10, pp. 1359-1366.
- Cunha, J.E.V (1992). Solos Lateríticos Estabilizados com Cimento Através da Metodologia da *ABCP*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande/PB.
- Diniz, R.F. (2002). A Erosão Costeira ao Longo do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte: Causas, Consequências e Influência nos Processos de Uso e Ocupação da Região Costeira. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Head, K.H. (1985). Manual of Soil Laboratory Testing. London: Pentech Press. v.2.
- Mohriak, W.U. (2003). Bacias Sedimentares da Margem Continental Brasileira. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil, Editores: L.A. Bizzi; C. Shobbenhaus; R.M. Vidotti e J.H. Gonçalves. Serviço Geológico do Brasil, pp. 87-168.

- Ortigão, J.A.R. (1993). *Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.
- Pereira, I.C.B.B.A. (2004). Contribuição ao Conhecimento do Meio Físico da Região do Complexo Estuarino-Lagunar Nísia Floresta-Papeba-Guaraíras. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- Pereira, K.L.A. (2012). Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- Rossetti, D.F.; Bezerra, F.H.R.; Dominguez, J.M.L. (2013). Late Oligocene-Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil. Earth-Science Reviews, 123, pp. 87–112.
- Santos Jr., O.F.; Severo, R.N.F.; Scudelari, A.C.; Amaral, R.F. (2008). Processo de Instabilização em Falésias: Estudo de um Caso no Nordeste do Brasil. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, SPG, ABMS, ABGE. n. 114, pp. 71-90.
- Severo, R.N.F. (2005). *Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa RN*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Severo, R.N.F. (2011). 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 de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Silva, W.S. (2003). Estudo da Dinâmica Superficial e Geotécnico das Falésias do Município de Tibau do Sul – Litoral Oriental do RN. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Souza Jr., C. (2013). *Análise da Estabilidade de Falésias na Zona Costeira de Baía Formosa/RN*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Vargas, M. (1978). *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil: Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Winterkorn, H.F; Fang, H.Y. (1975). *Soil Technology and Engineering Properties of Soils*. In: Foundation Engineering Handbook. Van Nostrand Reinhold Company, New York.