ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

RBGEA
REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Volume 14 (02)
2024
ISSN 2237-4590

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Publicação Científica da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

EDITORES

Prof. Dra. Alessandra Cristina Corsi – IPT
Prof. Dr. Eduardo Soares de Macedo – Consultor

REVISORES

Adalberto Aurélio Azevedo – Consultor
Alberto Pio Fiori – UFPR
Aline Freitas da Silva – DRM-RJ
Ana Elisa Silva de Abreu - UNICAMP
Andrea Valli Nummer –UFSM
Candido Bordeaux Rego Neto – IPUF
Clovis Gonzatti – CIENTEC
Denise de la Corte Bacci – USP
Diana Sarita Hamburger – UFABC
Edilson Pissato – USP
Eduardo Goulart Collares – UEMG
Emilio Velloso Barroso – UFRJ
Eraldo L. Pastore – Consultor
Fábio Soares Magalhães – Walm Engenharia
Fabricio Araujo Mirandola – IPT
Filipe Antonio Marques Falcetta – IPT
Frederico Garcia Sobreira – UFOP
Gerson Salviano Almeida Filho - IPT
Helena Polivanov – UFRJ
Ivan José Delatim – SIGA
João Francisco Alves Silveira – Consultor
Jorge Kazuo Yamamoto – USP
José Augusto de Lollo – UNESP
José Eduardo Zaine – UNESP
José Luiz Albuquerque Filho – IPT
José Mário Queiroga Mafra - Walm Engenharia
Leonardo Andrade de Souza - Zemlya
Leandro Eugênio da Silva Cerri – Consultor
Luis de Almeida Prado Bacellar – UFOP
Luiz Fernando D'Agostino – Núcleo
Luiz Nishiyama – UFU
Malva Andrea Mancuso – UFSM
Marcilene Dantas Ferreira – UFSCar
Marcio A. Cunha – Consultor
Marcio Fernandes Leão
Maria Heloisa B.O. Frascá – Consultora
Marta Luzia de Souza – UEM
Nelson Meirim Coutinho – GEORIO
Newton Moreira de Souza – UnB
Noris Costa Diniz -UnB
Omar Yazbek Bitar - IPT
Otávio Coaracy Brasil Gandolfo – IPT
Romildo Dias Moreira Filho
Reinaldo Lorandi – UFSCar
Ricardo Vedovello – IPA/SEMIL
Wilson Shoji Iyomasa - IPT

APOIO EDITORIAL
Denise Amaral

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO
Rita Motta e Ryan Dias – Editora Tribo da Ilha

Volume 14 (02)
2024
ISSN 2237-4590
DOI: 10.29327/241867.14.1

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

DIRETORIA ABGE GESTÃO 2025/2026

PRESIDENTE: Erik Wunder
VICE-PRESIDENTE: Luiz Alberto Minicucci
DIRETORA SECRETÁRIA: Bruna M. Cruz Fernandes
DIRETOR FINANCEIRO: Delfino Luiz Gouveia Gambetti
DIRETORA DE EVENTOS: Ana Elisa Silva de Abreu
DIRETOR DE COMUNICAÇÃO: Luiz Antonio Pereira de Souza

Conselho Deliberativo: Ana Elisa Silva de Abreu, Álvaro Rodrigues dos Santos, Bruna M. Cruz Fernandes, Camila Milli, Delfino Luiz Gouveia Gambetti, Erik Wunder, Flávio Rogério da Silva, João Antônio Curtis, João Luiz Armelin, José Luis Ridente, José Luiz Albuquerque, Lilian Pimentel, Luiz Alberto Minicucci, Luiz Antonio Pereira de Souza, Malena D'Elia Otero, Márcio Leão, Maria Heloisa B. Oliveira Frasca, Romildo Dias Moreira.

Conselho Consultivo: Fabio Soares Magalhães (Presidente), Adalberto Aurélio Azevedo(in memoriam), Carlos Manoel Nieble (in memoriam), Delfino Luiz Gouveia Gambetti, Fernando Facciola Kertzman, Fernão Paes de Barros (in memoriam), Giácomo Ré, Guido Guidicini, Jayme de Oliveira Campos, João Jerônimo Monticelli, Kenzo Hori, Luiz Ferreira Vaz (in memoriam), Luiz Francisco Saragiotto, Maria Heloísa Barros de Oliveira Frascá, Murillo Dondici Ruiz (in memoriam), Nivaldo José Chiossi, Tarcísio Barreto Celestino e Wilson Shoji Yiomasa.

NÚCLEO RIO DE JANEIRO / ESPÍRITO SANTO
Alano Burity dos Santos, Ana Caroline Duarte Dutra, Ana Paula Cezario da Silva, Giovanna Tristão, Isabella Robert Rodrigues, Jéssica Tiné Pôssa, Raquel Batista M. da Fonseca e Rodrigo Ferreira Franca.

NÚCLEO MINAS GERAIS
Alberto Ferreira do Amaral Junior, Ângelo Almeida Zenóbio, Denise Silva, Diego Moreira da Silva, Ellen Delgado Fernandes, Frederico Nascimento Mendes Bezerra, Giovana Parizzi, Michele Aparecida Flores Costa, Walter dos Reis Junior e Yan Lucas de O. P. Santos.

NÚCLEO SUL
Andréa Nummer, Cezar Augusto B. Bastos, Débora Lamberty, Karina R. Camargo, Malva Andrea Mancuso, Marcos A. Musso Laespiga e Nicole Borchardt.

NÚCLEO CENTRO OESTE
Bruno Presley, Caiubi Emanuel Souza Kuhn, Ingrid Ferreira Lima, Patrícia de Araújo Romão e Ricardo Vilhena.

NÚCLEO NORTE
Claudio Fabian, Dianne D. F. Fonseca, Elton Rodrigo de Andretta, Iris Celeste N. Bandeira, José Sidney Barros e Sheila G.Teixeira.

SECRETARIA ABGE
Gerente Executiva: Luciana Marques
Assistente Editorial: Denise Amaral
Assistente Administrativo: Kauany Santos
Assistente Administrativo: Vanessa Oliveira
Auxiliar Administrativo: Emilly Mendes
Auxiliar de Comunicação: Gabrielle Lima

Av. Prof. Almeida Prado, 532 – IPT (Prédio 59) | Cidade Universitária – São Paulo – SP
Fone: (11) 98687-6560
E-mail: abge@abge.org.br | Site: abge.org.br

SUMÁRIO

5 APRESENTAÇÃO

ARTIGOS CIENTÍFICOS

7 INFLUÊNCIA DEPOSICIONAL E PÓS-DEPOSICIONAL NA PERMEABILIDADE DE DEPÓSITOS EÓLICOS DA FORMAÇÃO SERGI, BACIA DO RECÔNCAVO
Luís Felipe Barreto Oliveira
Emilio Velloso Barroso
João Paulo Porto Barros
Thayssa Pereira de Andrade

26 DESENVOLVIMENTO DE MODELOS NEURAIS PARA AUXILIAR PROJETOS DE PAVIMENTOS NO ESTADO DO CEARÁ
Francisco Carlos Henrique Pio de Oliveira
Carla Beatriz Costa de Araújo
Suelly Helena de Araújo Barroso
Antonio Júnior Alves Ribeiro

CONTRIBUIÇÃO E REFLEXÃO

43 OS DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS NATURAIS NAS ENCOSTAS DA SERRA DO MAR – DIAGNÓSTICO DO FENÔMENO
Álvaro Rodrigues dos Santos

APRESENTAÇÃO

Estamos apresentando a segunda edição de 2024 da RBGEA – Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, a revista da ABGE. Nesta edição reunimos dois artigos técnico-científicos e uma contribuição.

No primeiro desses artigos, Luis Felipe Barreto Oliveira e colegas da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), trabalharam com os depósitos eólicos da Formação Sergi, na Bacia do Recôncavo analisando a influência das principais características sedimentares deposicional e pós-deposicional que controlam a permeabilidade.

Já Francisco Carlos Pio de Oliveira e outros, da Universidade Federal do Ceará apresentam modelos neurais para auxiliar projetos de pavimentos no estado do Ceará onde foi possível obter resultados significativos nos estudos de caracterização geológica-geotécnica de pavimentos, oferecendo uma abordagem inovadora para compreender as propriedades geotécnicas do solo subjacente às estradas e vias.

Na seção Contribuições e Reflexões publicamos material enviado pelo colega Álvaro Rodrigues dos Santos sobre os deslizamentos translacionais na Serra do Mar, propondo um diagnóstico do fenômeno.

Participe de nossa revista enviando seu artigo técnico, seu texto de reflexão, seu comentário ou sua sugestão para que possamos juntos fazer da RBGEA a revista de divulgação e integração da Geologia de Engenharia e Ambiental no Brasil.

Desejamos a todos uma ótima leitura.

ARTIGOS CIENTÍFICOS

INFLUÊNCIA DEPOSICIONAL E PÓS-DEPOSICIONAL NA PERMEABILIDADE DE DEPÓSITOS EÓLICOS DA FORMAÇÃO SERGI, BACIA DO RECÔNCAVO

DEPOSITIONAL AND POST-DEPOSITIONAL INFLUENCE ON THE PERMEABILITY OF WIND DEPOSITS OF THE SERGI FORMATION, RECÔNCAVO BASIN

LUÍS FELIPE BARRETO OLIVEIRA
Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, luisfelipe.b.oliveira@gmail.com

EMILIO VELLOSO BARROSO
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, emilio@geologia.ufrj.br

JOÃO PAULO PORTO BARROS
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, jp@geologia.ufrj.br

THAYSSA PEREIRA DE ANDRADE
Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, thayssapereira94@gmail.com
DF⁺ Engenharia, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

RESUMO

Maciços rochosos constituídos por arenitos eólicos muitas vezes são considerados depósitos homogêneos com relação às suas propriedades hidráulicas em função das suas características texturais. Além disso, a anisotropia de permeabilidade é considerada apenas com relação ao acamamento sedimentar. No entanto, tais hipóteses simplificadoras são refutadas por uma série de acidentes em barragens, os quais têm origem em processos de *piping* que resultam de fluxos concentrados em direções preferenciais de elevada velocidade.

Entender como as características estruturais e texturais dos arenitos eólicos podem controlar a heterogeneidade e a anisotropia da permeabilidade nessas rochas é um importante passo para a mitigação de problemas críticos em barragens e para a modelagem do fluxo de fluidos em reservatórios de água e óleo e gás.

Neste artigo apresentamos uma análise das principais características sedimentares que controlam a permeabilidade no arenito flúvio-eólico da Formação Sergi. Em um afloramento no Estado da Bahia, nós construímos um perfil estratigráfico na escala de 1:40 que permitiu individualizar as fácies sedimentares presentes

ABSTRACT

Rock masses composed of eolian sandstones are often considered homogeneous deposits regarding their hydraulic properties due to their textural characteristics. Additionally, permeability anisotropy is typically considered only concerning sedimentary layering. However, several dam failures caused by piping processes resulting from concentrated flows in preferential high-velocity directions refute these simplifying hypotheses.

Understanding how eolian sandstone's structural and textural characteristics can control the heterogeneity and anisotropy of permeability in these rocks is a significant step toward mitigating critical problems in dams and modeling fluid flow in water and oil and gas reservoirs.

In this article, we analyze the main sedimentary characteristics that control permeability in the fluvial-eolian sandstone of the Sergi Formation. At an outcrop in Bahia, we constructed a stratigraphic profile at a scale of 1:40, allowing us to individualize the sedimentary facies at the site. We performed at least ten air permeability measurements at the outcrop in each identified facies. These measurements guided

no local. No afloramento, em cada fácies identificada, realizamos um mínimo de dez medidas de permeabilidade ao ar. A análise das medidas de permeabilidade orientou a amostragem de blocos do arenito, com cerca de 40 cm de aresta, na fácies frente de dunas. Sobre as seis faces destes blocos, uma malha regular com 2 cm de espaçamento orientou novas medidas de permeabilidade ao ar no laboratório. Com as medidas aplicou-se a análise geoestatística para a avaliação da distribuição da permeabilidade na escala de laboratório. Os resultados da pesquisa apontam para controles sin deposicionais, como a orientação das paleocorrentes e da distribuição das fácies, como pós deposicionais, como a diagênese e a bioturbação.

Palavras-chave: Permeabilidade; Anisotropia; Heterogeneidade; Barragens; Reservatórios de água e petróleo.

the sampling of sandstone blocks, about 40 cm in edge length, from the dune front facies. On the six faces of these blocks, a regular grid with 2 cm spacing directed new air permeability measurements in the laboratory. Using these measurements, we applied geostatistical analysis to evaluate the permeability distribution at the laboratory scale. The research results indicate syn-depositional controls, such as the orientation of paleocurrents and facies distribution, and post-depositional controls, such as diagenesis and bioturbation.

Keywords: Permeability; Anisotropy; Heterogeneity; Dams; Water and petroleum reservoirs.

1. INTRODUÇÃO

Cerca de 60% da superfície do território brasileiro é formada por bacias sedimentares, com a presença de rochas brandas quanto à resistência, sobretudo folhelhos, siltitos e arenitos. Dadas suas características geotécnicas, estas rochas foram evitadas em grandes projetos de engenharia, seja por realocação do empreendimento ou por escavação completa destas rochas no local da obra (Dobereiner 1990). Além de outros projetos executivos, no Brasil mais de 80 barragens foram construídas em arenitos. As características geotécnicas dos arenitos podem ser extremamente variáveis, o que têm motivado, em todo o mundo, diversas investigações sobre propriedades geomecânicas destas rochas (Zhao et al. 2022, Oliveira et al. 2018, Alikarami et al. 2013) e o seu comportamento em obra (Wang & Hao 2023, Nieble et al. 2021, Pastore et al. 2015).

A permeabilidade dos arenitos também é um aspecto bastante relevante para a geotecnia. Os resultados de ensaios de campo e de laboratório muitas vezes apresentam elevada dispersão (Wunder 2016), provavelmente em razão da anisotropia intrínseca da matriz (Jiang et al. 2021, Bass et al. 2007), heterogeneidade composicional e textural das amostras (Germanou et al. 2018) ou ainda do controle estrutural no maciço rochoso em ensaios in situ. Essas características são controladas por processos sin e pós-deposicionais (Milhomem et al. 2003, Azevedo 2005, Garcia et al. 2005, Clavaud et al. 2008, Qiao et al. 2020, Zoback 2010).

Dentre os diversos ambientes associados aos arenitos, os depósitos eólicos apresentam excelente permeabilidade e se constituem em reservatórios de hidrocarbonetos ou sistemas aquíferos no Brasil, podendo-se citar o exemplo do Sistema Aquífero Guarani (Rosa Filho et al. 2003), do qual participam os arenitos flúvio-eólico da Formação Pirambóia e os arenitos eólicos da Formação Botucatu. Do ponto de vista geotécnico, as elevadas condutividades hidráulicas podem trazer questões relacionadas à erosão por *piping*, estanqueidade dos reservatórios de água e para o tratamento de fundações de estruturas hidráulicas.

No Brasil, a Formação Sergi (Jurássico Superior) é o principal reservatório de hidrocarbonetos da Bacia do Recôncavo-BA, região onde estão presentes diversas obras de infraestrutura, como estradas, barragens e um pólo petroquímico. Depositada na fase Pré-Rifte da bacia (Lanzarini & Terra 1989, Magnavita et al. 2005, Scherer et al. 2005, Nogueira 2007), essa formação é essencialmente composta por arenitos quartzosos e conglomerados, estando associada ao desenvolvimento de um sistema flúvio-eólico com efêmera sedimentação lacustre. Os sistemas eólicos prevalecem nas porções inferior e superior da unidade e

são compostos por estratos de dunas, interdunas secas ou lençóis de areia, com estratificação horizontal e cruzada, além de interdunas com intensa bioturbação (Torres Ribeiro 2002, Magnavita et al. 2005, Scherer et al. 2006, Scherer & De Ros 2009, Ballén et al. 2013).

Embora, litologicamente homogêneos, existem variações nos parâmetros texturais, diagenéticos e no desenvolvimento de estruturas sedimentares, que podem influenciar na porosidade e permeabilidade das camadas que compõem os arenitos eólicos da Formação Sergi. A complexidade da arquitetura deposicional pode resultar em barreiras ao fluxo de fluidos, afetando suas velocidades e gerando poropressões elevadas no interior do maciço rochoso.

O objetivo do trabalho é compreender a influência de parâmetros texturais, mineralógicos, estruturas sedimentares e feições diagenéticas na permeabilidade absoluta de arenitos eólicos, tomando-se como laboratório os arenitos da Formação Sergi. Para este fim, foram realizadas análises que integram dados obtidos em trabalhos em campo e laboratório.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Bacia do Recôncavo localiza-se no Leste do Estado da Bahia, Região Nordeste do Brasil, perfazendo uma área de aproximadamente 11.500 km² (Silva et al. 2007), conforme ilustra a Figura 1.

Essa província geológica é considerada um ramo abortado, parte do sistema de riftes Recôncavo-Tucano-Jatobá, RTJ (Neto & Oliveira, 1985), que registra a quebra do Supercontinente Gondwana e associada à abertura da margem Atlântica, ocorrida durante o início do Eocretáreo (Salem et al. 2000, Magnavita et al. 2005, Rabelo & Nogueira 2015, Almeida da Costa et al. 2021).

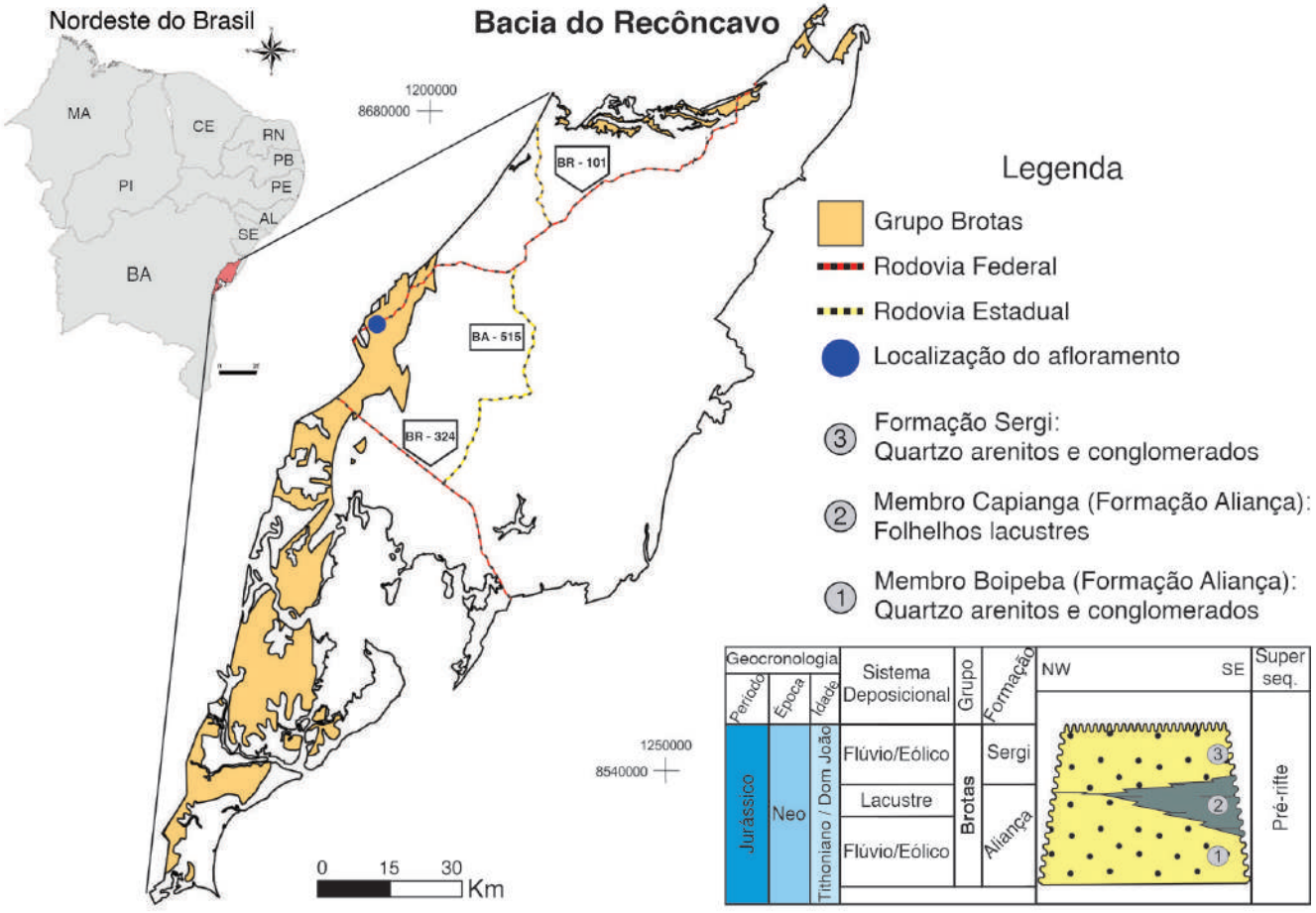


Figura 1. Localização da Bacia do Recôncavo. A Formação Sergi aflora na borda oeste da bacia. O afloramento estudado (círculo azul escuro) é acessado pela BR-101.

Fonte: Diagrama estratigráfico com base em Silva et al. 2007)

O preenchimento sedimentar durante o estágio Pré-Rifte (Dom João - Rio da Serra) é caracterizado por ambientes deposicionais em ciclos flúvio-eólicos e lacustres (Silva et al. 2007). Durante esse estágio ocorreu a deposição das rochas reservatório das formações Aliança (Membro Boipeba) e Sergi, sendo os arenitos Formação Sergi o principal reservatório dessa província sedimentar, em razão da sua grande extensão, homogeneidade litológica e excelentes propriedades petrofísicas e hidráulicas, como a porosidade e a permeabilidade (Lanzarini & Terra,1989, Magnavita et al. 2005, Scherer et al. 2005, Scherer & De Ros 2009, Almeida da Costa et al. 2021).

A Formação Sergi (Neojurássico) possui espessura máxima de 450 m, com estratos inclinados para leste (Scherer & De Ros 2009), sendo composta por quartzoarenitos com granulometria variada, conglomerados finos e lamitos, depositados durante variações de umidade bem definidas, em períodos de seca e chuva (Neto & Oliveira 1985, Garcia et al. 2005, Scherer et al. 2005, Scherer & De Ros 2009). Os ambientes e subambientes observados nessa formação são responsáveis por criar diversos depósitos com características sedimentológicas e petrofísicas próprias.

De acordo Lanzarini & Terra (1989) na maior parte da Formação Sergi predominam as condições fluviais. Dessa forma, nas poções inferiores, as fácies fluviais são majoritárias, enquanto as fácies eólicas têm origem no retrabalhamento de barras de canais temporariamente expostas ou do sistema de canais abandonados. No topo, como aumento da aridez, o sistema fluvial é progressivamente abandonado e o retrabalhamento pelo vento dos sedimentos expostos leva à formação de grandes campos de dunas. Esses campos de dunas constituem interessantes reservatórios, uma vez que apresentam uma distribuição relativamente mais homogênea de propriedades petrográficas e petrofísicas, sendo materiais interessantes para o estudo da relação entre essas características (Nichols 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo teve início com a seleção de um afloramento da Formação Sergi, localizado na rodovia BR-101, entre o Km 140 e Km 150 (Figura 2). A identificação das principais litofácies do afloramento foi feita com base nas propriedades litológicas (granulometria, textura, cor, estruturas sedimentares e relação das camadas). A descrição e interpretação das fácies seguiu o método de Walker (2006). Durante a descrição foi elaborado um perfil estratigráfico em escala 1:40.

Para as medições de permeabilidade, tanto em campo como em laboratório, foi utilizado o permeâmetro portátil a gás modelo TinyPerm3. Quando o pistão deste permeâmetro se enche de ar, este é pressionado contra a superfície da rocha, no afloramento ou no laboratório. Na etapa seguinte ocorre a injeção do ar na rocha, etapa em que o equipamento monitora o fluxo transiente e a variação do volume de ar. As medidas são registradas e armazenadas automaticamente em um telefone celular conectado ao equipamento por bluetooth. Os valores de permeabilidade são calculados a partir do decaimento da pressão de injeção de ar em regime de fluxo transiente (Hurst & Rosvoll 1991, Huysmans et al. 2008, Brown & Smith 2013).

A permeabilidade nas camadas do afloramento foi determinada com base em dez medidas,

Figura 2. O afloramento estudado está localizado na BR-101. A seção geológica é composta por depósitos eólicos de campo de dunas e depósito lacustre no topo. Notar a indicação da localização do perfil estratigráfico (ver resultados).

tomadas de forma distribuída ao longo da face frontal da rocha exposta no afloramento. Dentre as camadas de permeabilidade aferidas no campo, a que apresentou um dos maiores valores e distribuição mais homogênea foi amostrada na forma blocos orientados com arestas variando entre 40 e 50 cm. A finalidade das medidas de permeabilidade nos blocos levados ao laboratório foi avaliar a distribuição das permeabilidades em três dimensões nesta e escala de observação.

Em laboratório, as medidas de permeabilidade dos cinco blocos coletados foram realizadas em malha de células de 2cm X 2cm, de modo a padronizar as medidas realizadas em todas as superfícies dos blocos (Figura 3). As dimensões das células da malha foram escolhidas baseadas nas dimensões da ponta de medida do permeâmetro TinyPerm3. Foram tomados cuidados para que não houvesse irregularidades na superfície da rocha de forma a se evitar o escape do gás durante a medida.

A partir dos blocos amostrados foram confeccionadas lâminas petrográficas impregnadas com corante azul, para realce do espaço poroso existente. A descrição em escala microscópica foi realizada considerando diferentes atributos: presença de laminação, tamanho/granulometria dos grãos do arcabouço, moda, seleção, arredondamento, circularidade, trama, matriz, compactação, cimentação e porosidade (Tucker 2001). Posteriormente à descrição, foram obtidas fotomicrografias de cada lâmina para a elaboração de mosaicos fotomicrográficos.

O mosaico fotomicrográfico de cada lâmina petrográfica, foi obtido a partir da sobreposição de microfotografias por toda a lâmina, utilizando o microscópio de luz transmitida, com nicóis paralelos, aumento de 2,5X e resolução de 1388 X 1040 pixels. As fotomicrografias foram remontadas para formar uma imagem única da lâmina. Com essa imagem foi possível realizar uma quantificação de porosidade, por análise digital de imagem (ADI).

O ADI foi realizado com o software IMAGEJ com a extensão JPOR. O software quantifica a porosidade pelo percentual de pixels que representam o espaço poroso (diferentes tonalidades de azul) em relação ao total de pixels da lâmina (nas demais cores).

4. RESULTADOS

4.1 Avaliação de campo

O afloramento possui aproximadamente 15 m de altura e exibe, predominantemente, depósitos eólicos compostos por dunas, interdunas úmidos e interdunas secos ou lençóis de areia. Essas camadas apresentam cimentação fraca e são subdivididas, quanto às suas estruturas, e repetem-se até a implementação do depósito lacustre no topo da sequência.

Nessa sucessão sedimentar, descrita no afloramento da Figura 2, ocorrem duas principais famílias de fraturas: F1, com mergulho para SW (209/70) e F2, com direção de mergulho para SE (125/80). A partir da descrição do afloramento e da elaboração do perfil estratigráfico (Figura 4), foi possível identificar cinco litofácies (Tabela 1).

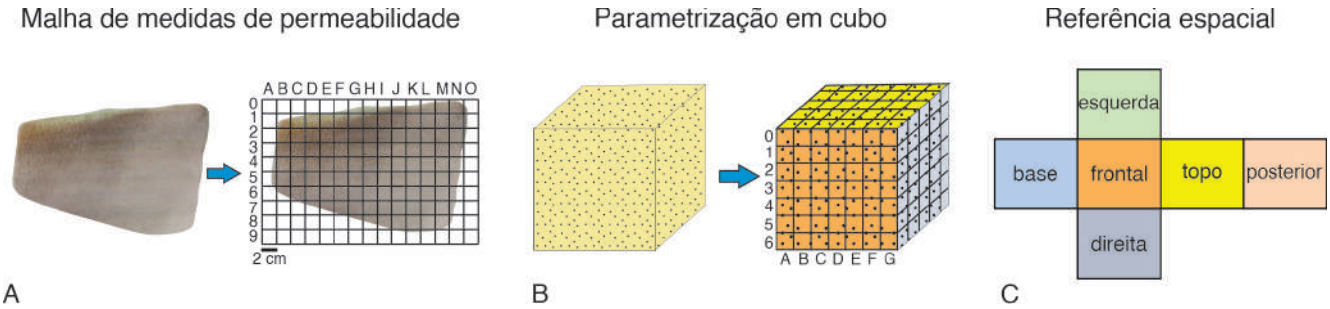


Figura 3. Método para obtenção da permeabilidade dos blocos, em laboratório. As medições são realizadas conforme o posicionamento da malha em cada face da amostra, os resultados em cada superfície são parametrizados e referenciados conforme a orientação dos blocos.

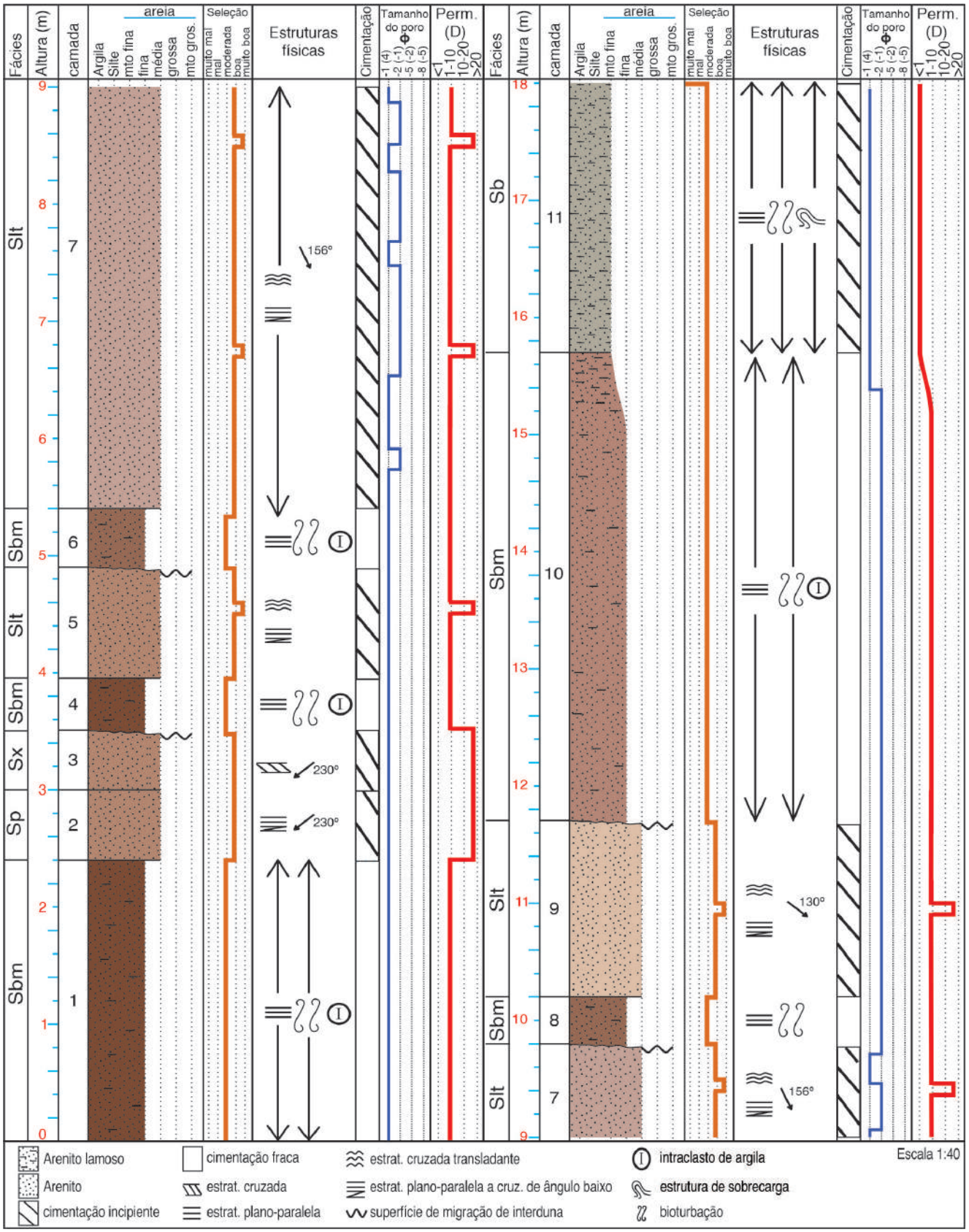


Figura 4. Perfil estratigráfico elaborado na atividade de campo.

Tabela 1. Litofácies do afloramento estudado, com os valores de permeabilidade medidos

Código / Fácies	Descrição	Processo	Interpretação
Sb Arenito bioturbado	Arenito lamoso composto por quartzo argilominerais de caulinita >15%, muscovita <5%. A granulometria é areia muito fina, moderadamente a bem selecionado, subarredondados a subangulosos e esfericidade alta. Cimentação fraca e bioturbação intensa, que oblitera as estruturas físicas. Possui laminação plano-paralela, deformações por sobrecarga e fraturas. Cor: cinza claro / cinza (5Y 7/ 5/1). Poros de 0,5mm a 0,062mm (mesoporo pequeno). Permeabilidade absoluta máxima 0,6 D	Alternâncias entre em regime de fluxo superior e episódios de decantação de partículas em condições sub aquosas. Ocorrem momentos de exposição subaérea e intensa atividade biogênica.	Lagos efêmeros (lc) gerados em períodos e inundação ou planícies de inundação de rios efêmeros, em áreas de interduna (Figura 5a).
	Sinonímia: Sd (Mescolotti et al. 2019), As (Rabelo & Nogueira 2015), Sm(ae) (Bongiolo & Scherer 2010).		
Slt Arenito com laminação plano-paralela e cruzada transladante	Arenito composto essencialmente por quartzo, granulometria areia, bem selecionado, subarredondado a arredondado, esfericidade baixa. Possui cimentação fraca, lâminas (<1cm) de argila, e camadas (5cm) de areia grossa. Ocorre laminação plano-paralela à cruzada de ângulo baixo (<5°) e cruzada transladante e paleocorrente para SE. Cor vermelho pálido (10 R 7/3). Poros de 4mm a 0,062mm (mesoporo pequeno a mesoporo grande). Permeabilidade absoluta máxima 3,4 D.	Variações em regime de fluxo subcrítico com preservação de feições onduladas produzidas pelo vento (*ripples* eólicas). Condições de transporte gerando superfícies de deflação.	Interduna seco (ids). ou lençóis de areia (Figura 5b).
	Sinonímia: Sr (Mescolotti et al. 2019), Ap (Rabelo & Nogueira 2015), As(ae)/Sr (Bongiolo & Scherer 2010).		
Sx Arenito fino com estratificação cruzada	Arenito composto por por quartzo e muscovita (< 5%), areia média, grãos bem selecionados, subarredondados, esfericidade baixa. Cimentação fraca, lâminas (<1cm) de argila e camadas (pouco mais de 1cm) subordinadas de areia grossa. Possui estratificação cruzada e paleocorrente orientada para SW. Cor bruno-avermelhado-claro (2.5 YR 6/4). Ocorrem duas famílias de fraturas principais, denominadas F1 (SW) e F2 (SE). Poros de 4mm a 0,062mm (mesoporo pequeno a mesoporo grande). Permeabilidade absoluta máxima 66,2 D.	Regime de fluxo superior subaéreo, preservando estruturas sedimentares. Migração de formas de leito por transporte eólico.	Duna (d), região de barlavento de (Figura 5c).
	Sinonímia: Sp (Mescolotti et al. 2019), Apc (Rabelo & Nogueira 2015), Sl (Bongiolo & Scherer 2010).		
Sp Arenito fino com estratificação plano-paralela	Arenito composto predominantemente por quartzo e muscovita (< 5%), granulometria areia média, bem selecionado, sub anguloso a anguloso, esfericidade baixa. Cimentação fraca, mas com nmais desenvolvidas no topo, lâminas (<1cm) de argila e camadas de areia grossa (pouco maior do que 1cm de espessura). Cor bruno-avermelhado-claro (2.5 YR 6/4). Possui estratificação plano-paralela, estratificação cruzada de baixo ângulo e paleocorrente orientada para SW. Ocorrem duas famílias de fraturas principais, denominadas F1 (SW) e F2 (SE). Poros de 4mm a 0,062mm (mesoporo pequeno a mesoporo grande). Permeabilidade absoluta máxima 49,8 D.	Deposição regida pela alternância entre processos de chuva de grãos (*gainfall*) e avalanche ou deslizamento de grãos (*grainflow*) gerando gradação inversa.	Duna ou frente de duna (d), região de sotavendo (Figura 4c).
	Sinonímia: Sl (Mescolotti et al. 2019), Act (Rabelo & Nogueira 2015).		
Sbm Arenito bioturbado e mosqueado	Arenito composto, predominantemente, por quartzo, biotita < 5% e muscovita. Granulometria areia média a muito fina (moda areia média), moderadamente a bem selecionados, subangulosos e esfericidade alta. A cimentação incipiente, causada por percolação de ferro, gera mosqueamento dos horizontes. Possui intraclastos de argila, laminação plano-paralela, intensa bioturbação (oblitera estruturas). Ocorre porosidade secundária, causada por falhas e fraturas. Poros de 0,5mm a 0,062mm (mesoporo pequeno). Permeabilidade absoluta máxima 4,8 D.	Deposição em regime de fluxo inferior em condições subaéreas com períodos de alagamento, retendo partículas de silte e argila. Ocorre variação do nível freático e ação biogênica.	Interduna úmido (idh). (Figura 5d)
	Sinonímia: St1 (Mescolotti et al. 2019), Aep (Rabelo & Nogueira 2015), Sp/Sh (Bongiolo & Scherer 2010)		

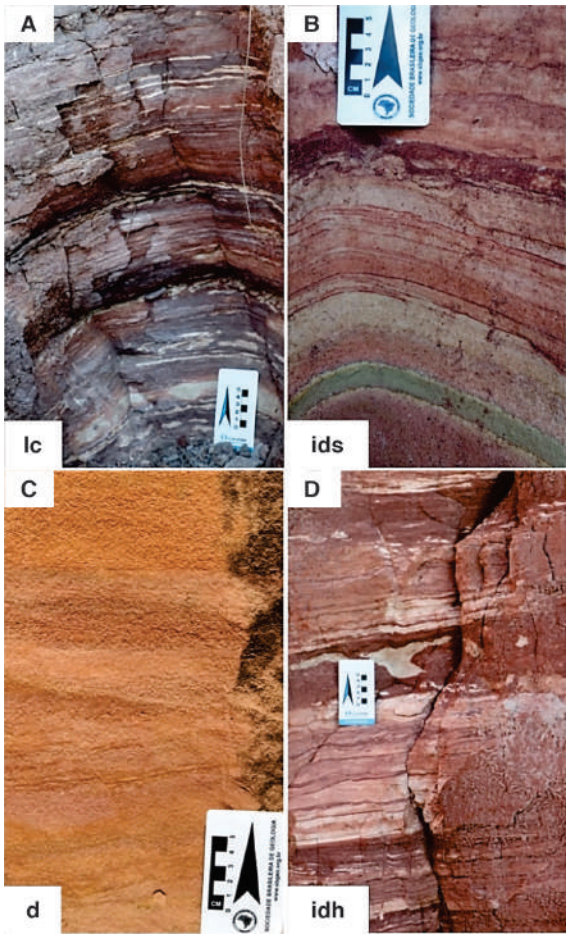


Figura 5. Os depósitos do campo de dunas foram subdivididos em: lagos efêmeros (a) que se sobrepõem ao interduna seco (b), dunas (c) e interduna úmido (d).

No campo, a permeabilidade absoluta foi medida nas 11 camadas identificadas, totalizando 110 medidas. Os dados de permeabilidade absoluta para cada camada podem ser observados na décima trilha da Figura 4. A camada menos permeável é a dos depósitos lacustres, com valores variando de 0,02 a 0,6 D. Nos depósitos de origem eólica, as menores permeabilidades foram encontradas nas interdunas úmidas, com valores de 0,1 a 6,6 D, seguida das camadas de interduna seca ou lençóis de areia, com resultados de 0,4 a 10 D. As maiores permeabilidades foram medidas nas camadas de duna, nas ripples da região barlavento e frente de duna, e na região de sotavento, com permeabilidades variando de 10,9 a 66,2 D.

Com os dados das 11 camadas foram elaborados *boxplots* (Figura 6), enfatizando os maiores valores de permeabilidade absoluta encontrados nas camadas referentes às fácies de ripples (Sx) e frente de duna (Sp), respectivamente, as camadas C2 e C3 (numeração das camadas na Figura 4). A maior parte das distribuições de permeabilidade apresenta assimetria negativa, exceção da camada C4 (assimetria positiva), como se pode observar pela posição da mediana no intervalo interquartil.

Apesar das maiores permeabilidades absolutas terem sido medidas na camada C3, a camada escolhida para a coleta dos blocos orientados e demais etapas do trabalho foi a C2 (Figura 7). A camada C2 apresentou uma distribuição mais simétrica de permeabilidade, comparada à C3, fato relevante para a etapa seguinte do estudo. Interpretadas como frentes de dunas, foram amostrados os blocos P5_2F'', P5_2G, P5_2H, P5_2I e P5_2J, para análises detalhadas da permeabilidade em laboratório.

4.2. Petrografia

Os parâmetros texturais dos blocos foram analisados a partir de um total de 90 medidas dos tamanhos dos grãos, que variam de areia grossa

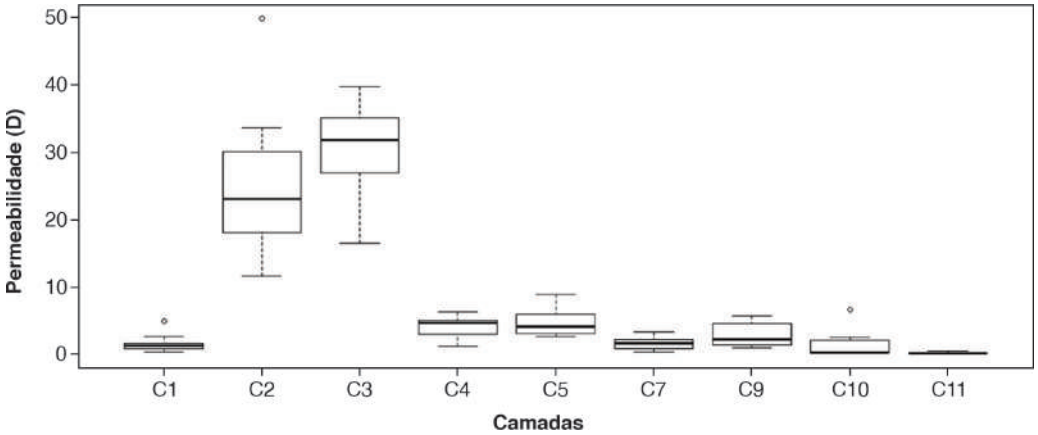


Figura 6. *Boxplot* das permeabilidades absolutas medidas nas camadas do afloramento (C1 a C11).

até areia muito fina, ocorrendo em um padrão bimodal (principal areia média a fina e secundária areia muito fina a grossa), característico de arenitos eólicos. Os grãos maiores estão arredondados a subarredondados e com esfericidade baixa, enquanto os grãos menores são subarredondados a subangulosos e de esfericidade alta. Esses arenitos apresentam estratificações horizontal e cruzada de baixo ângulo (<5º).

O espaço poroso foi caracterizado macroscopicamente com realização de 65 medidas de tamanho de poros, que são classificados como tamanho mesoporo pequeno (Figura 8) A rocha apresenta porosidade primária, do tipo intergranular e porosidade secundária dos tipos por fratura e, em raros casos, móldica por dissolução de grãos de feldspato. Foram observados diferentes graus de cimentação, mais desenvolvidos, sobretudo, no topo e na base de alguns blocos, essa cimentação oblitera a porosidade.

Figura 7. Camada C2 com elevados valores de permeabilidade absoluta e distribuição mais uniforme no afloramento (A). Detalhe para a superfície da camada (B), com a capa de alteração e superfície regularizada para melhorar o acoplamento do permeâmetro ao afloramento durante os ensaios in situ.

As lâminas petrográficas dos arenitos estudados são (P5_2F" L (face lateral), P5_2F" T (face topo) e P5_2G). O quartzo é o mineral predominante, P5_2F"T e P5_2G possuem maior proporção de minerais secundários, especificamente muscovita e sericita, esta última em variados estágios de desenvolvimento a partir da alteração dos microclínios e plagioclásios, se concentrando principalmente nas clivagens destes minerais.

Os grãos variam de tamanho areia grossa até areia muito fina, sendo a moda principal constituída por areia média a fina e a moda secundária composta de areia muito fina e areia grossa. Em relação a orientação de grãos, ocorre uma orientação sutil em P5_2F"L, destacada pelos grãos maiores.

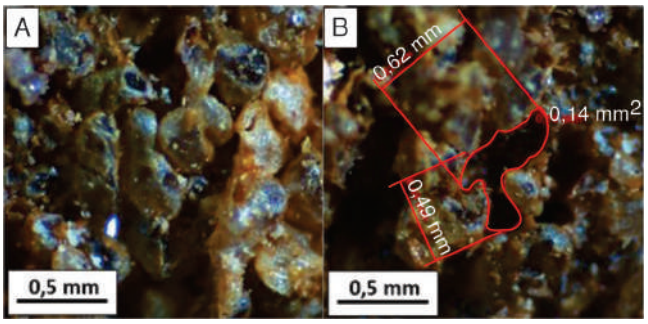


Figura 8. Grãos e poros observados em estereomicroscópio (A) medidas de poros e área realizadas pelo software ZEN blue 3.0 (B).

O empacotamento observado nas lâminas é do tipo aberto, com pequenas variações em relação a proporção de contatos. A P5_2F"L possui contato entre grãos principalmente do tipo flutuante e, em menor proporção, contatos pontuais e longos. Em P5_2F"T, assim como em P5_2G, contatos flutuantes, pontuais e longos são mais presentes. A trama é sustentada pelos grãos que, em função do tipo de arranjo, demonstram um baixo grau de compactação. (Figura 9).

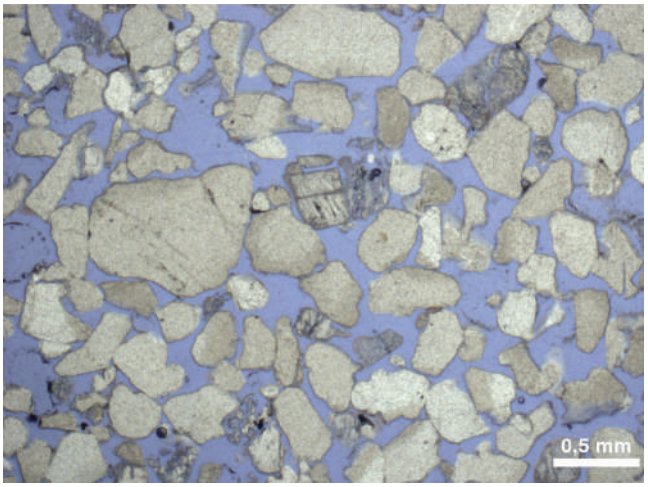


Figura 9. Empacotamento aberto e contatos pontuais da lâmina P5_2F"L.

Não ocorre matriz nas rochas, exceto epimatriz por infiltração de argila em decorrência da

alteração dos grãos do arcabouço. A cimentação é pouco desenvolvida em P5_2F"L, sendo principalmente do tipo epitaxial, por óxido de ferro e, em menor proporção, por argila, e mais raramente também ocorre cimentação do tipo sintaxial.

Além da classificação dos tipos de poros, a proporção de vazios nas lâminas foi quantificada por ADI, de mosaicos fotomicrográficos das lâminas, com os seguintes resultados 19,3% P5_2F"T (face topo); 36,2% P5_2F"L (face lateral) e 11,6% P5_2G.

4.3. Permeabilidade absoluta dos blocos (em laboratório)

Um total de 3156 medidas de permeabilidade absoluta foi realizada nos blocos orientados e amostrados no campo, que apresentaram variações de 10,9 a 126 D, com os seguintes intervalos e médias, por face de todos os cinco blocos: 6,9 até 61,2 D (média de 29 D) no topo, 12,1 até 46,7 D (média de 20,9 D) na base, 17,3 até 61,8 D (média de 33.1 D) na face frontal, 18,7 até 60,7 D (média de 33.6 D) na face posterior, 20 até 62,4 D (média de 34.5 D) no lado esquerdo e 18,9 até 58,7 D (média de 33.2 D) no lado direito. Os valores de permeabilidade encontrados foram, inicialmente, tradados e analisados quanto à estatística descritiva (Tabela 2).

As maiores médias e menores coeficientes de variação foram encontrados, principalmente, nas faces laterais dos blocos (frontal, posterior, esquerdo e direito), que correspondem às direções de fluxo paralelas à estratificação sedimentar. Nestas direções a distribuição tende a ser mais simétrica (Figura 10) e menores as diferenças porcentuais entre a média e a mediana (Tabela 2). Via de regra, a permeabilidade absoluta horizontal, paralela à estratificação sedimentar, é maior do que a permeabilidade vertical. Os dados de anisotropia mostram faixas de valores variando de próximos da unidade (anisotropia mínima ou quase isotrópico) até valores muito superiores a 1,3. Os valores de permeabilidade para o bloco P5 2G apresentaram anisotropias máxima e mínima extremamente elevadas, podendo-se classificá-las como anômalas.

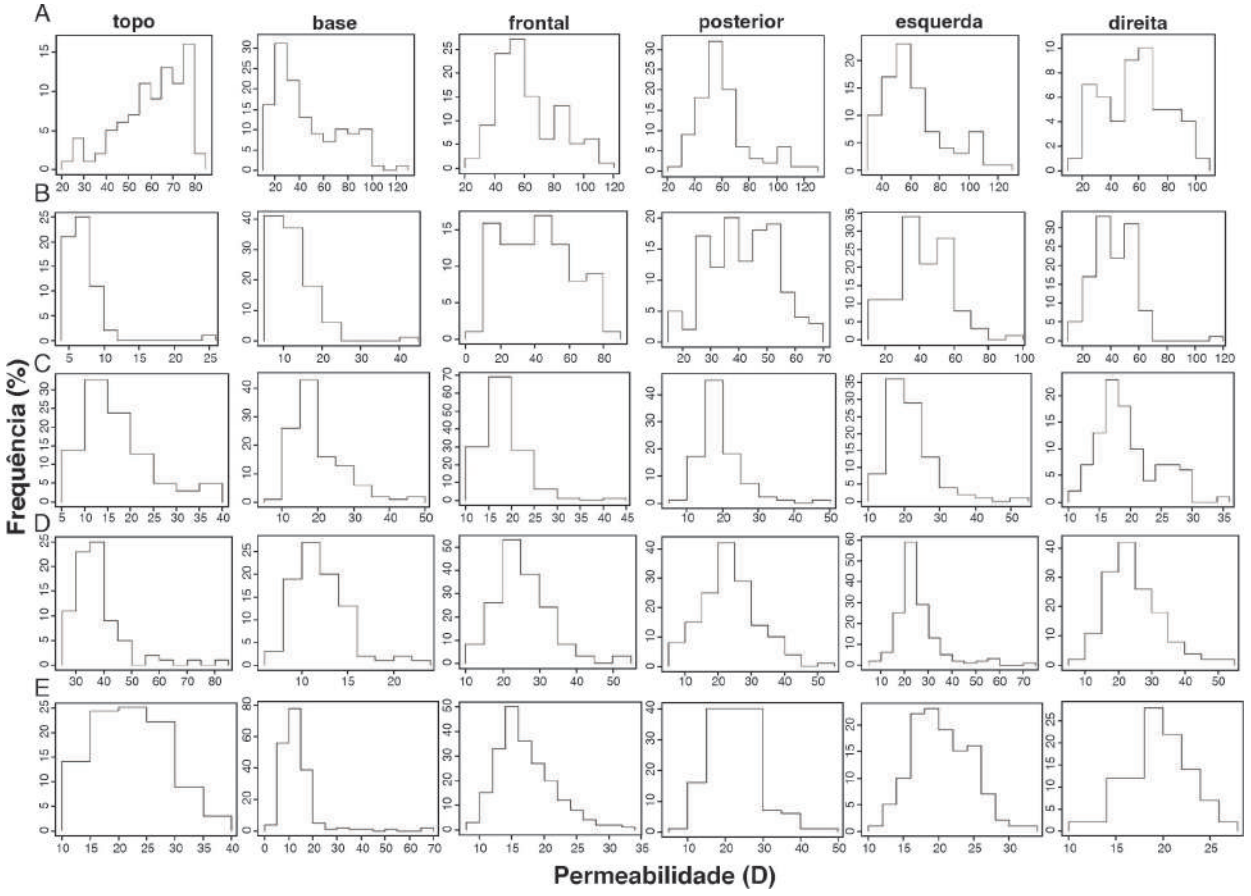


Figura 10. Distribuições das permeabilidades nos blocos. P5_2F (a); P5_2G (b); P5_2H (c); 5_2I (d); P5 (e)

Tabela 2. Estatística descritiva e anisotropia dos dados das permeabilidades absolutas obtidas nos blocos. A diferença percentual foi calculada tomando-se a mediana como referência. A penúltima e a última colunas mostram a anisotropia máxima e mínima da permeabilidade absoluta, respectivamente, tomando-se a mediana como referência. A permeabilidade vertical refere-se às faces de topo e base, enquanto as demais faces estão relacionadas com a permeabilidade absoluta horizontal.

Bloco/ medidas	Face	Mediana (D)	Média (D)	Diferença (%)	Desv. Padrão (D)	Coef. de Variação (%)	$\frac{KH_{max}}{Kv_{min}}$	$\frac{Kh_{min}}{KV_{max}}$
P5_2F'' (564)	topo	63,9	61,2	4,2	14,4	23,6	1,6	0,9
	base	36,8	46,7	-26,9	26,1	55,8		
	frontal	57,1	61,8	-8,2	20,4	20,4		
	posterior	56,3	60,8	-8,0	19,9	32,8		
	esquerda	56,3	62,4	-10,8	21,3	34,0		
	direita	59,0	58,7	0,5	23,2	39,6		
P5_2G (493)	topo	6,4	6,9	-7,8	3,0	42,6	6,6	3,4
	base	11,8	12,4	-5,1	5,0	40,6		
	frontal	40,6	41,1	-1,2	19,4	45,3		
	posterior	42,4	41,9	1,2	11,9	28,3		
	esquerda	41,0	42,8	-4,4	17,1	40,5		
	direita	42,1	42,6	-1,2	16,0	37,0		
P5_2H (626)	topo	15,8	17,2	-8,9	7,3	42,2	1,3	1,0
	base	17,8	20,2	-13,5	7,3	36,3		
	frontal	17,7	18,3	-3,4	4,5	24,6		
	posterior	17,2	18,7	-8,7	5,9	31,4		
	esquerda	20,4	21,7	-6,4	6,4	29,4		
	direita	18,4	19,6	-6,5	4,9	25,1		
P5_2I (620)	topo	36,0	37,4	-3,9	9,6	25,8	2.1	0,6
	base	11,8	12,1	-2,5	2,9	24,1		
	frontal	24,8	25,6	-3,2	7,4	29,0		
	posterior	23,4	23,6	-0,9	8,4	35,5		
	esquerda	22,9	25,3	-10,5	10,8	42,4		
	direita	23,1	24,7	-6,9	10,0	38,8		
P5_2J (853)	topo	22,4	22,5	-0,4	6,3	28,0	1,9	0,7
	base	11,5	13,2	-14,8	8,3	62,9		
	frontal	16,3	17,2	-5,5	3,5	20,2		
	posterior	22,0	22,6	-2,7	6,2	27,0		
	esquerda	20,0	20,5	-2,5	3,4	17,1		
	direita	19,6	19,4	1,0	2,5	13,3		

Assim como nos dados de campo, de um modo geral, a distribuição das permeabilidades tende a apresentar assimetria negativa (figura 10). Com relação ao coeficiente de variação, os blocos P5_2H e P5_2J apresentam maiores valores para as medidas realizadas nas faces de topo e base, no entanto, de uma forma geral, os coeficientes de variação são bastante semelhantes e elevados, em todas as faces, indicando um meio heterogêneo na escala de estudo.

Nos blocos P5_2F" e P5_2G foram criadas superfícies planas e orientadas perpendicularmente à direção medida de paleocorrente ou orientação do *foreset* (230°/20°), com uma diferença de pouco mais de 13° em relação às superfícies apresentadas anteriormente. Dessa forma, foram criadas duas faces ortogonais à direção da paleocorrente, denominadas face 1 e face 2, correspondendo às superfícies de entrada e saída do fluxo da paleocorrente, respectivamente (Figura 11).

Tabela 3. Estatística dos dados de permeabilidade, segundo a direção da paleocorrente.

Bloco	Mediana (D)	Média (D)	Diferença (%)	Des. Padrão (D)	Coef. Variação (%)
P5_2F" (face 1)	59,2	66,1	-11,7	23,6	35,6
P5_2F" (face 2)	63,7	66,8	-4,9	25,3	37,9
P5_2G (face 1)	42,5	42,5	0,0	10,9	25,7
P5_2G (face 2)	49,5	46,6	5,9	13,5	29,1

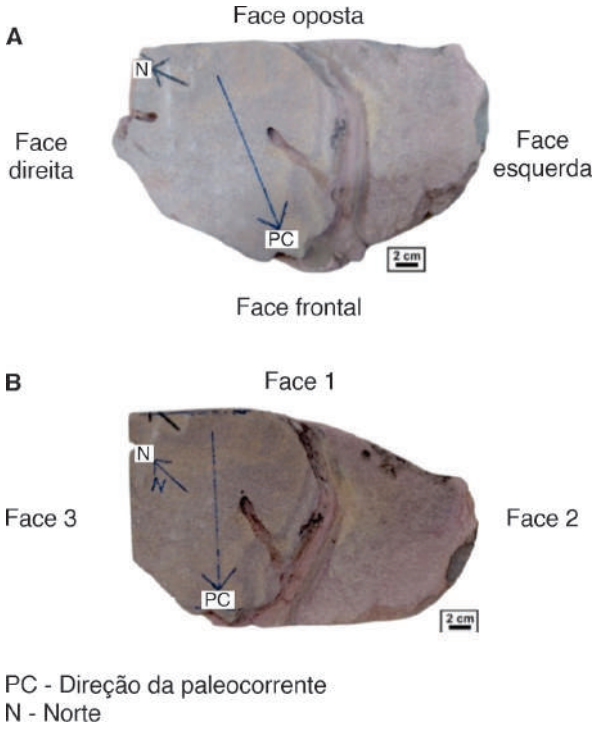


Figura 11. Bloco P5_2G com visão em planta, mostrando as superfícies referenciadas após sua remoção do afloramento (A) e com as novas superfícies, criadas segundo a orientação da paleocorrente (B).

Foram realizadas 246 medidas de permeabilidade adicionais nas novas superfícies criadas. Os resultados dessas medidas indicaram um aumento no valor da permeabilidade média na direção da paleocorrente em relação às demais superfícies estudadas. Considerando ainda a direção da paleocorrente, não foram observadas variações significativas no valor médio da permeabilidade segundo o sentido medido nesta direção (Tabela 3). O bloco P5_2F" exibiu uma distribuição simétrica a assimétrica negativa nessas superfícies, enquanto o bloco P5_2G, uma distribuição com assimetria positiva (Figura 12). Na mesma figura, estão representados os dados de permeabilidade absoluta, coletados nas superfícies do topo e laterais orientadas pela paleocorrente dos blocos, os também foram representados em semivariogramas ajustados em modelo exponencial.

Os parâmetros observados nos gráficos não mostram efeito pepita, indicando um perfil de medidas quase contínuo, uma covariância ou patamar com média de 0,1 D e a máxima distância de covariância, ou alcance, com média de 4,2cm no bloco P5_2F" e média de 2,4cm no bloco P5_2G.

Foram feitas interpolações por Krigagem Ordinária (Figura 13), utilizando as medições de permeabilidade absoluta e suas variações, descrita nos semivariogramas, o que possibilitou visualizar o comportamento dessa propriedade nas amostras estudadas.

A variação de permeabilidade devido a processos *sin* e pós deposicionais em conjunto, foi mais visível nas faces laterais dos blocos, exibindo um padrão de interpolações com uma sutil organização, intercalados conforme as estruturas sedimentares da estratificação da rocha.

O padrão de interpolações devido à preponderância de processos pós deposicionais, seja função da diagênese ou da presença de interduna úmida, foi mais bem observado no topo e base dos materiais, os quais não possuem uma distribuição organizada da permeabilidade.

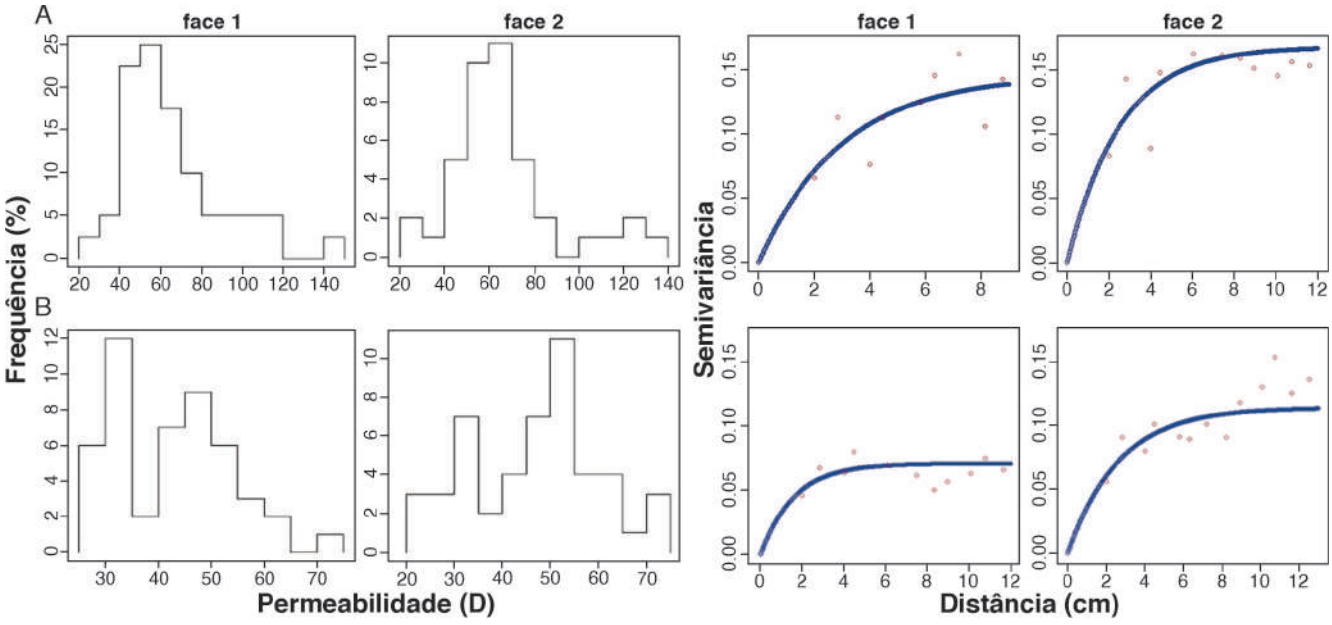


Figura 12. Distribuições das permeabilidades absolutas medidas na direção das paleocorrentes (esq.) e semivariogramas empíricos (vermelho) e ajustados (azul), para superfícies ortogonais (face 1 e 2), na direção da paleocorrente dos blocos P5_2F" (A) e P5_2G (B).

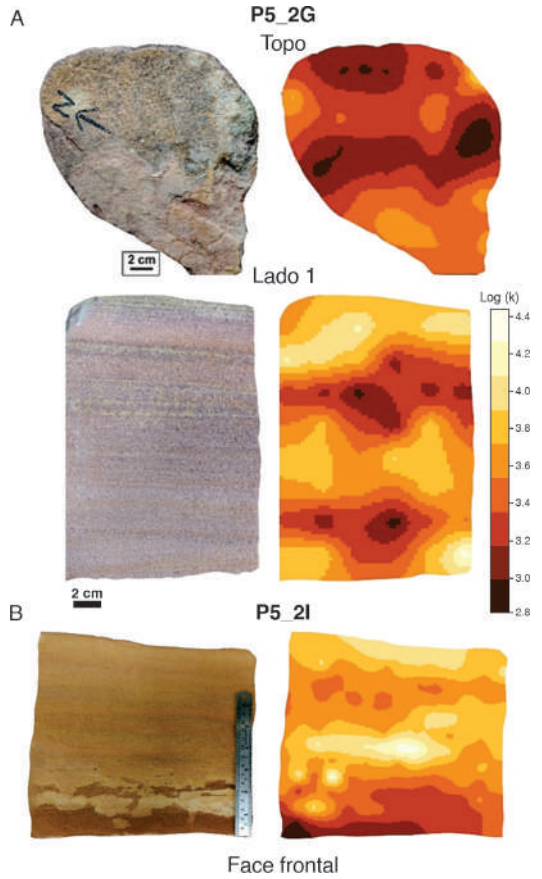


Figura 13. Superfície analisada e Krigagem Ordinária correspondente em dois blocos. No bloco P5_2G é possível observar um padrão mais organizado na face lateral e sem organização no topo (A), Face frontal do bloco P5_2, demonstrando a mudança na interpolação, pela presença de interduna úmida (B).

5. DISCUSSÃO

Os depósitos observados possuem características sedimentares e estruturais semelhantes aos depósitos eólicos descritos por Scherer et al. (2005) e Ballén et al. (2013). Compostos por dunas, interdunas úmidas, semelhantes às descritas por Torres Ribeiro (2002) e Scherer & De Ros (2009), além de interdunas secas, ocorrendo regiões adjacentes às dunas, as quais migram através desses planos e extensos lençóis de areia, como mostrado por Kocurek & Nielson (1986) e Scherer et al. (2006), Scherer & De Ros (2009), Bongiolo & Scherer (2010), Rabelo & Nogueira (2015) e Mescolotti et al. (2019).

Essa configuração encontrada se trata de uma característica correspondente ao registro dos depósitos eólicos iniciais da Formação Sergi, pertencente a Sequência I, segundo Scherer & De Ros (2009), ou Sergi Inferior, de acordo com Lanzarini & Terra (1989) e Magnavita et al. (2005).

Na análise petrográfica, os blocos de arenito coletados apresentam diferenças em relação a diagênese e, consequentemente, a presença e/ ou desenvolvimento de epimatriz, além de cimentação, por variação da percolação de óxidos de ferro e/ ou argila, como proposto por Scherer & De Ros (2009).

Em relação a maturidade textural composicional das lâminas das fácies analisadas, as diferentes condições de retrabalhamento e os graus de alteração observados nos variados tipos de quartzo e outros minerais constituintes, sugerem a contribuição de diferentes áreas fonte de sedimentos na sua composição.

Na fácies Sp ou frente de duna, a partir da deposição, ocorre cimentação incipiente, por percolação de óxido de ferro e, em menor proporção, argila, seguida de um baixo grau de compactação. Ainda na fácies Sp, especificamente em regiões mais alteradas, por processos pós deposicionais, como é o caso do topo das camadas, assim como na fácies Sbm de um modo geral, ocorre epimatriz, resultante da alteração de grãos do arcabouço e posterior infiltração no espaço poroso, além de uma maior proporção de argila infiltrada, obliterando os poros.

Em Slt, o empacotamento é mais fechado, apesar de não haver desenvolvimento avançado de matriz e/ou cimento. Isso sugere maior compactação e soerguimento mais tardio em relação às demais fácies observadas.

A maior porosidade observada nas lâminas está associada, sobretudo, a uma maior atuação de processos *sin* deposicionais, com pouco desenvolvimento de processos pós-deposicionais, como diagênese e bioturbação. As maiores porosidades estão localizadas na fácies Sp, especificamente acompanhando a orientação da estrutura sedimentar presente.

A redução no percentual estimado de porosidade está associada ao desenvolvimento de epimatriz, principalmente na fácies Sbm além de um maior empacotamento, como na fácies Slt.

É importante ressaltar que, em ensaios de porosidade utilizando porosímetro a gás, a viscosidade do gás utilizado é menor do que a viscosidade da resina usada na impregnação das lâminas, para a quantificação dos poros em análise digital de imagem. Dessa forma, em vista da menor percolação da resina nos poros da rocha, a contabilização do espaço poroso tende a ser menor na petrografia (Silva e Stael 2018).

Essa etapa foi importante para auxiliar no entendimento do comportamento da permeabilidade nesses materiais (Machado 2012, Nogueira, 2007). A distribuição de valores encontrados nas medições do estudo, principalmente nas camadas de duna com permeabilidades maiores que 20 D, é considerada um requisito para reservatórios tidos como de alta produtividade, relacionado a uma taxa satisfatória de recuperação de hidrocarbonetos (Selley, 1996, Lucia, 2007).

Por outro lado, a heterogeneidade da distribuição das permeabilidades nas fundações e ombreiras de barragens em arenitos é um tema relevante para a Geologia de Engenharia. Em alguns cenários, mesmo com valores elevados de permeabilidade global do maciço rochoso, esperados e medidos, fluxos preferenciais podem ser controlados por estruturas tectônicas ou sedimentares. Nesses casos a complexidade do problema considerando a estanqueidade do reservatório e os tratamentos das ombreiras e fundações pode exigir métodos de investigação especiais para identificação de zonas com permeabilidades anomalamente altas, como o uso de traçadores (Wang et al. 2019), ou as técnicas de uso mais frequente nos projetos de investigação geotécnica, como o uso da geofísica de superfície e em poços (Cardarelli et al. 2018) e a hierarquização e o zoneamento do maciço de fundação segundo zonas de distintas permeabilidades (Foyo et al. 2005). Baseados em suas experiências em barragens sobre arenitos, Nieble et al. (2021) corroboram com o presente estudo e destacam a dificuldade da correta caracterização da permeabilidade em arenitos dada a heterogeneidade geológica e, muitas vezes, agravada pelo número reduzido de sondagens. Os autores relatam ainda um conjunto relativamente grande de casos de danos às estruturas de barragens construídas sobre arenitos no Brasil, decorrentes de processos de erosão interna (*piping*) e erosão em superfície, além de questões associadas à friabilidade (comuns nestas rochas) e dificuldades de injetabilidade para tratamento das fundações com cimento Portland comum.

O comportamento de maiores médias e menores coeficientes de variação de permeabilidade, observado nas laterais dos blocos, em comparação com as outras superfícies (topo e base) pode ser justificado pelo plano das estratificações e níveis formados por areia grossa, interpretados como sendo produtos da avalanche ou deslizamento de grãos na frente da duna (*grainflow*) (Hurst & Rosvoll 1991, Nichols 2009, Scherer & De Ros 2009).

A presença de interduna úmida gera a redução da permeabilidade porque essa fácies possui um menor tamanho de poros, obliterados pela presença de silte, argilominerais, infiltração mecânica de argila residual e ainda a atuação biogênica, que também obliteram estruturas físicas. Esses resultados corroboram com a influência de heterogeneidades em pequenas escalas, na distribuição de propriedades hidráulicas (Etris et al. 1988, Lanzarini & Terra 1989, Hurst & Rosvoll 1991, Bruno 1994, Magnavita et al. 2005, Scherer & De Ros, 2009, Qiao et al. 2020). Do ponto de vista geotécnico, zonas de baixa permeabilidade podem levar a excessos de poropressão, cuja dissipação poderá ser lenta mesmo em meios de alta permeabilidade quando associados a camadas silto-argilosas em carregamentos cíclicos, (Pender et al., 2016).

Segundo Selley (1996), variações nos tamanhos dos grãos causam mudanças tão notáveis na permeabilidade, quanto à orientação, forma e distribuição dessas partículas. Lucia (2007) e Wang et al. (2020) indicam que a permeabilidade, assim como outros parâmetros petrofísicos, podem variar em diferentes direções, sendo condicionada por heterogeneidades do material, como variações no tamanho, forma e seleção dos grãos, além de processos pós-deposicionais, como feições diagenéticas, obliterando a porosidade e estruturas sedimentares, como observado nessas superfícies.

A relação entre o ângulo de obliquidade e a variação de permeabilidade, comparando uma superfície orientada com outra, não orientada segundo a direção da paleocorrente, demonstra que a estratificação produz anisotropia de permeabilidade, associada a orientação das estruturas, como descrito por Huysmans et al. (2008).

A variação de permeabilidade também se deve a relação entre a preponderância e/ ou desenvolvimento de processos *sin* e pós deposicionais. Assim como estudado por Mcbride et al. (1987), Etris et al. (1988) e Hurst & Rosvoll (1991), as médias de valores de permeabilidade são maiores em regiões com feições primárias de deposição, associadas a processos *sin* deposicionais, principalmente naquelas com diagênese incipiente, ou mesmo ausente.

Foram observados valores anômalos ou *outliers* em alguns *boxplots* gerados, principalmente em relação ao bloco P5_2H. Essas permeabilidades muito elevadas e pontuais também são indicativos da presença de descontinuidades no material, por falhas, fraturas, truncando as estruturas sedimentares, (Silva 1966, Selley 1996, Hurst & Rosvoll 1991, Huysmans et al. 2008, Scherer & De Ros 2009, Akana & Didei 2017).

A diferença na distribuição de permeabilidade das novas superfícies, orientadas segundo a direção da paleocorrente, se deve a níveis com cimentação em diferentes escalas de desenvolvimento, obliterando os poros e conferindo uma heterogeneidade pela diagênese (Milhomem et al 2003, Lucia 2007, Scherer & De Ros 2009).

De acordo com Huysmans et al. (2008), Ritzi & Soltanian (2015) e Al-Mudhafar (2018), os resultados dos parâmetros encontrados nos semivariogramas ajustados, indicam um elevado grau de correlação entre as variáveis, fornecendo uma predição acurada e condizente com a separação espacial proposta para as medições. Essas observações corroboram com o método utilizado para as medições de permeabilidade e análise da sua distribuição, utilizando o GRID com células de 2x2 cm (Al-Mudhafar 2018).

O padrão de interpolação obtido por meio da Krigagem Ordinária pode ser relacionado às diferentes intensidades observadas dos processos *sin* e pós deposicionais, assim como a presença de interduna úmida na base do bloco P5_2I, como demonstrado por Huysmans et al. (2008) e Ritzi & Soltanian (2015).

6. CONCLUSÕES

O presente estudo tornou possível quantificar e relacionar diretamente as propriedades geológicas e petrofísicas de arenitos eólicos, mostrando a influência de processos *sin* deposicionais, como orientação da paleocorrente, regimes de fluxos deposicionais e estruturas sedimentares por correntes, e pós deposicionais, como cimentação, diagênese e bioturbação, na distribuição da permeabilidade e porosidade dessas rochas.

Do ponto de vista metodológico, mostrou-se a utilidade a praticidade de um permeâmetro que utiliza o próprio ar como elemento de injeção. Este equipamento ainda é pouco utilizado em

investigações geotécnicas, embora permita a rápida obtenção de um grande volume de dados de permeabilidade absoluta, contribuindo positivamente para o entendimento da distribuição desta propriedade hidráulica em maciços rochosos.

Uma estrutura sedimentar, sendo uma organização de grãos em uma rocha sedimentar, como no caso de *ripples* e dunas, promove um incremento na permeabilidade observada na direção e sentido de tal orientação. Esse fato demonstra que a caracterização dos arenitos para fins de engenharia precisa considerar esse elemento, mesmo quando em meios considerados relativamente mais homogêneos do ponto de vista geológico, como os depósitos eólicos. A presença de estruturas no maciço rochoso relacionadas às paleocorrentes, por exemplo, pode controlar direções de fluxo com maiores permeabilidades e serem responsáveis por processos de *piping*, gerando instabilidades nas fundações e ombreiras de barragens construídas sobre arenitos de origem eólica Esse entendimento reafirma a importância e necessidade de se considerar a heterogeneidade sedimentológica, deposicional e diagenética em diferentes escalas nesses materiais, em seu processo de explotação, como reservatórios de hidrocarbonetos e aquíferos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro por acolher e pela oportunidade a dois dos autores deste artigo e à Petrobras/ANP pelo financiamento de parte desta pesquisa através do projeto "*Análise Experimental Hidromecânica da Reativação de Falhas e das Relações Tensão-Deformação-Permeabilidade de Rochas Reservatório*".

REFERÊNCIAS

Akana T.S. & Didei I. S. 2017. Paleocurrent analysis of the sandstone body in Akpoha and its enviorns (Lower Benue Trough) South-East Nigeria. Journal of Geology & Geophysics, 6:6.

Alikarami R., Torabi A., Kolyukhin D., Skurtveit E. 2013. Geostatistical relationships between mechanical and petrophysical properties of deformed sandstone. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 63:27-38. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.06.002

Almeida da Costa A., Mateo J., Patel R., Trivedi J.J., Soares J.B.P., Rocha P.S., Costa G., Embiruçu M. 2021. Can low salinity water injection be an efficient option for the Recôncavo Basin? An experimental and simulation case study. Journal of Petroleum Science and Engineering, 202:108557

Al-Mudhafar W.J. 2018. Integrating core porosity and well logging interpretations for multivariate permeability modeling through ordinary kriging and co-kriging algorithms. In: OTC, Offshore Technology Conference, Proceedings, p.1-17

Azevedo F.S. 2005. Estudo experimental da influência de tensões na permeabilidade de rochas produtoras de petróleo. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 151p.

Baas J.H., Hailwood E.A., McCaffrey W.D., Kay M., Jones R. 2007. Directional petrological characterisation of deep-marine sandstones using grain fabric and permeability anisotropy: Methodologies, theory, application and suggestions for integration. Earth-Science Reviews, 82:101-142. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.02.003

Ballén O.A.R., Góes A.M., Negri F.A., Maziviero M.V., Teixeira, V.Z.S. 2013. Sistema eólico úmido nas sucessões sedimentares interderrames da Formação Mosquito, Jurássico da Província Parnaíba, Brasil. Brazilian Journal of Geology, 43:695–710.

Bongiolo D.E. & Scherer C.M.S. 2010. Facies architecture and heterogeneity of the fluvial-aeolian reservoirs of the Sergi formation (Upper Jurassic), Recôncavo Basin, NE Brazil. Marine and Petroleum Geology, 27: 1885–1897.

Bruno, M.S. 1994. Micromechanics of stress-induced permeability anisotropy and damage in sedimentary rock. Mechanics of Materials, 18:31–48.

Cardarelli E., Cercato M., De Donno G. 2018. Surface and borehole geophysics for the rehabilitation of a concrete dam (Penne, Central Italy). Engineering Geology, 241:1-10.

Clavaud J.B., Maineul, A., Zamora, M., Rasolofosaon, P., Schlitter, C. 2008. Permeability anisotropy and its relations with porous medium structure. Journal of Geophysical Research, 113:1-8. https://doi.org/10.1029/2007JB005004

Dobereiner L. 1990. Weak rocks in Brazil, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 42: 21-29. https://doi.org/10.1007/BF02592616

Etris E.L., Brumfield, D.S., Ehrlich R., Crabtree S.J. 1988. Relations between pores, throats and permeability: A petrographic/physical analysis of some carbonate grainstones and packstones. Carbonates and Evaporites, 3:17–32.

Foyo A., Sánchez M. A, Tomillo C. 2005. A proposal for a secondary permeability index obtained from water pressure tests in dam foundations. Engineering Geology, 77:69-82.

Garcia A.J.V., da Ros Á.A.S., Goldberg K. 2005. Paleoenvironmental and paleoclimatic control on early diagenetic processes and fossil record in Cretaceous continental sandstones of Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 19:243–258. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2005.01.008

Germanou L., Ho M.T., Zhang Y., Wu L. Intrinsic and apparent gas permeability of heterogeneous and anisotropic ultra-tight porous media. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 60:271-283. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.10.003

Hurst A. & Rosvoll K.J. 1991. Permeability in sandstones and their relationship to sedimentary structures. In (Lake, L. W., Carroll, H. B. and Wesson, T. C. (Eds.). Reservoir Characterization II. San Diego, CA, Academic Press, p. 166-196.

Huysmans M., Peeters L., Moermans G., Dassargues A. 2008. Relating small-scale sedimentary structures and permeability in a cross-bedded aquifer. Journal of Hydrology, 361:41–51.

Jangda Z., Menke H., Busch A., Geiger S., Bultreys T., Singh K. 2024. Subsurface hydrogen storage controlled by small-scale rock heterogeneities. International Journal of Hydrogen Energy, 60:1192-1202. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.233

Jia C., Alkaabi S., Hu J., Sepehrnoori K., Yao J., Zhang L. 2024. Impact of rock heterogeneity on reactive flow during acid stimulation process. International Journal of Heat and Mass Transfer, 227:125560. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125560

Jiang T., Yao W., Sun X., Qi C., Li X., Xia K., Zhang J., Nasseri M.H.B. 2021. Evolution of anisotropic permeability of fractured sandstones subjected to true-triaxial stresses during reservoir depletion. Journal of Petroleum Science and Engineering, 200:108251. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108251

Kocurek G. & Nielson J. 1986. Conditions favourable for the formation of warm-climate aeolian sand sheets. Sedimentology, 33:795-816.

Lanzarini W. L. & Terra G.J.S. 1989. Fácies sedimentares, evolução da porosidade e qualidade de reservatório da Formação Sergi, Campo de Fazenda Boa Esperança, Bacia do Recôncavo. Boletim de Geociências da Petrobras, 3: 365-375.

Lucia F.J. 2007. Carbonate Reservoir Characterization: An Integrated Approach. Springer-Verlag, Nova York, 226 p.

Machado A.C. 2012. Estudo de parâmetros microestruturais de rochas-reservatório para diferentes resoluções utilizando microtomografia computadorizada 3D. Dissertação de Mestrado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 57p.

Magnavita L.P., Silva R.R., Sanches C.P. 2005. Guia de campo da Bacia do Recôncavo, NE do Brasil. Boletim de Geociências da Petrobras, 13:301-334.

Mcbride E.E., Land S., Mack L.E. 1987. Diagenesis of eolian and fluvial feldspathic sandstones,

Norphlet Formation (Upper Jurassic), Rankin County, Mississippi, and Mobile County, Alabama. AAPG Bulletin, 9:1019–1034.

Mescolotti P.C., Varejão F.G., Warren L.V., Ladeira F.S.B., Giannini, P.C.F., Assine M.L. 2019. The sedimentary record of wet and dry eolian systems in the Cretaceous of Southeast Brazil: stratigraphic and paleogeographic significance. Brazilian Journal of Geology, 49:1-20.

Milhomem P.S., Mama, E.J., Oliveir, F.M., Carvalho, M.S.S., Lima W.S. 2003. Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Recôncavo. Fundação Paleontológica Phoenix, 51.

Neto A.S.T. & Oliveira J.J. 1985. O Preenchimento do Rift-Valley na Bacia do Recôncavo. Revista Brasileira de Geociências, 15:97-102.

Nichols G. 2009. Sedimentology and stratigraphy. Wiley-Blackwell, Oxford, 419p.

Nieble C.M., Guidiccini, G., de Mello L.G. 2021. Barragens em arenitos brandos no Brasil. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo. 267 p.

Nogueira M.C.D. 2007. Estudo das relações entre tensão, deformação e permeabilidade e sua dependência das características geológicas de rochas reservatório. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 153p.

Oliveira O.M., Bim R., Nunes G.B, Higashi R.A.R. 2018. Geotechnical aspects of weak sandstone from Recife/Brazil. Soils and Rocks, 41:61-74. https://doi.org/ 10.28927/SR.411061

Pastore E.L., Cruz P.T., Freitas Junior M.S. 2015. Fundações de barragens e estruturas em arenitos: natureza dos maciços e controle de fluxo e erosões. In: CBDB, Seminário Nacional e Grandes Barragens, 30, Anais, 15 p.

Pender M.J., Orense, R.P., Wotherspoon, L.M., Storie, L.B. 2016. Effect of permeability on the cyclic generation and dissipation of pore pressures in saturated gravel layers. Géotechnique, 66:313-322. https://doi.org/10.1680/jgeot.SIP.15.P.024

Qiao J., Zeng J., Jiang S., Wang Y. 2020. Impacts of sedimentology and diagenesis on pore structure and reservoir quality in tight oil sandstone reservoirs: implications for macroscopic and microscopic heterogeneities. Marine and Petroleum Geology, 111:279-300. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.008

Rabelo C.E.N. & Nogueira A.C.R. 2015. O sistema desértico úmido do Jurássico Superior da Bacia do Parnaíba, na região entre Formosa da Serra Negra e Montes Altos, Estado do Maranhão, Brasil. Geologia USP - Série Científica, 15:3–21.

Ritzi R. W. & Soltanian M. R. 2015. What have we learned from deterministic geostatistics at highly resolved field sites, as relevant to mass transport processes in sedimentary aquifers? Journal of Hydrology, 531:31-39.

Rosa Filho E.F., Hindi E.C., Rostirolla, S.P., Francisco J.F.F., Bittencourt A.V.L. 2003. Sistema aquífero Guarani – considerações preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no fluxo das águas subterrâneas. Rev. Águas Subterrâneas, 17:91-112.

Salem A.M., Morad S., Mato L.F., Al-Aasm, I.S. 2000. Diagenesis and reservoir-quality evolution of fluvial sandstones during progressive burial and uplift: Evidence from the Upper Jurassic Boipeba Member, Recôncavo Basin, Northeastern Brazil. AAPG Bulletin, 84:1015-1040.

Scherer C.M., Lavina E.L., Dias Filho D.C., Oliveira F.M., Bongiolo, D.E., Aguiar, E.S. 2005. Evolução estratigráfica da sucessão flúvio-eólica-lacustre da Formação Sergi, Bacia do Recôncavo, Brasil. In: ANP, Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 3., Anais. Disponível em: http://www.portalabpg.org.br/site_portugues/eventos.html. Acessado em: 30 set. 2020.

Scherer C.M.S. & De Ros L.F. 2009. Heterogeneidades dos reservatórios flúvio-eólicos da Formação Sergi na Bacia do Recôncavo. Boletim Geociências Petrobrás, 17:249-271.

Scherer C.M.S., Lavina E.L.C., Filho D.C.D., Oliveira F.M., Bongiolo D.E., Aguiar, E.S. 2006.

Stratigraphy and facies architecture of the fluvial-aeolian-lacustrine Sergi Formation (Upper Jurassic), Recôncavo Basin, Brazil. Sedimentary Geology, 194:169-193. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.06.002

Selley R.C. 1996. Ancient sedimentary environments and their sub-surface diagnosis. Routledge, London, 326 p.

Silva C.A.M. & Stael G.C. Integração entre os parâmetros petrofísicos e petrográficos em arenitos do Grupo Itararé da Bacia do Paraná. *In*: SBGf, Simpósio Brasileiro de Geofísica, VIII, Anais, Meio digital.

Silva N. M. 1966. Paleocorrentes deposicionais na Formação Sergi. Boletim Técnico da Petrobras, 9:181-209.

Silva O.B., Caixeta J.M., Milhomem P.S., Kosin M.D. 2007. Bacia do Recôncavo. Boletim de Geociências Petrobras, 15:423-431.

Torres Ribeiro, M. 2002. Fácies sedimentares e arquitetura deposicional da Formação Sergi (Jurássico Superior), Bacia do Recôncavo. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 98p.

Tucker M.E. 2001. Sedimentary Petrology. Blackwell Science, Oxford, 262 p.

Walker R.G. 2006. Facies models revisited: introduction. In: Posamentier H.W. & Walker R.G. (Eds.). Facies models revisited. Society for Sedimentary Geology Special Publication, 84, p.: 1-19.

Wang Q. & Hao S. 2023. Creep behavior and permeability evolution of red sandstone in three Gorges Reservoir area subjected to cyclic seepage pressure. Geomechanics for Energy and the Environment, 36:100498. https://doi.org/10.1016/j.gete.2023.100498.

Wang S., Wang L., Wang Y. 2023. Influence of material heterogeneity on the blast-induced crack initiation and propagation in brittle rock. Computers and Geotechnics, 55:105203. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105203

Wang T., Chen J., Li P., Yin Y., Shen C. 2019. Natural tracing for concentrated leakage detection in a rockfill dam. Engineering Geology, 249:1-12.

Wang Z., Luo, X. Lei, Y. Zhang L., Shi H., Lu J., Cheng M., Liu N., Wang X., He Y. & Jiang T. 2020. Impact of detrital composition and diagenesis on the heterogeneity and quality of low-permeability to tight sandstone reservoirs: an example of the Upper Triassic Yanchang Formation in Southeastern Ordos Basin. Journal of Petroleum Science and Engineering, 195:107596

Wu M., Gao K., Liu J., Song Z., Huang X. 2022. Influence of rock heterogeneity on hydraulic fracturing: a parametric study using the combined finite-discrete element method. International Journal of Solids and Structures, 234–235: 111293. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111293

Wunder E. 2016. Caracterização geomecânica e hidrogeológica do arenítico eólico da Formação Sambaíba – Bacia do Parnaíba. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 6:44-55.

Zhan L. Hu Y., Zou L. Xu W. Ye Z., Chen R., Zhuang D., Li J., Chen Y. 2022. Effects of multiscale heterogeneity on transport in three-dimensional fractured porous rock with a rough-walled fracture network. Computers and Geotechnics, 48:104836. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104836

Zhao J., Tan Z., Wang X., Zhou Z., Li G. 2022. Engineering characteristics of water-bearing weakly cemented sandstone and dewatering technology in tunnel excavation. Tunnelling and Underground Space Technology, 121:104316. https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104316.

Zoback M.D. 2010. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, New York, 461p.

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS NEURAIS PARA AUXILIAR PROJETOS DE PAVIMENTOS NO ESTADO DO CEARÁ

DEVELOPMENT OF NEURAL MODELS TO ASSIST FLOORING PROJECTS IN THE STATE OF CEARÁ

FRANCISCO CARLOS HENRIQUE PIO DE OLIVEIRA
Univ. Fed. do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil franciscocarloshpo@gmai.com

CARLA BEATRIZ COSTA DE ARAÚJO
Univ. Fed. do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil carlabeatriz@ufc.br

SUELLY HELENA DE ARAÚJO BARROSO
Univ. Fed. do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil suelly@det.ufc.br

ANTONIO JÚNIOR ALVES RIBEIRO
Univ. Fed. do Ceará, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará junior.ribeiro@ifce.edu.br

RESUMO

O conhecimento geológico desempenha um papel essencial no planejamento e na execução de obras de pavimentação. Através do avanço com uso das redes neurais artificiais foi possível obter resultados significativos nos estudos de caracterização geológica-geotécnica de pavimentos, oferecendo uma abordagem inovadora para compreender as propriedades geotécnicas do solo subjacente às estradas e vias. A modelagem neural, quando há disponibilidade de dados em quantidade e qualidade adequados possibilita a previsão de uma variedade de características geotécnicas dos solos, podendo ser uma opção de estimativa mais econômica e complementar em relação à obtenção tradicional de dados por meio apenas de ensaios de laboratório de Módulo de Resiliência necessários para projeto de pavimentos. O objetivo principal deste trabalho é desenvolver modelos neurais, por meio do uso de inteligência artificial para serem aplicados em projetos de pavimentação no Estado do Ceará. Para isso, foram levantados bancos de dados contendo informações geotécnicas de pavimentos do Estado do Ceará. Ao total os bancos de dados contém mais de um mil dados abrangendo informações de propriedades físicas do solo, Califórnia Bearing Ratio e classificação AASHTO. Todos estes dados são oriundos do projeto da Universidade Federal em parceria

ABSTRACT

Geological knowledge plays an essential role in the planning and execution of paving works. Through advancements in artificial neural networks, significant results have been achieved in geological-geotechnical characterization studies of pavements, offering an innovative approach to understanding the geotechnical properties of the soil underlying roads and highways. Neural modeling, when adequate quantity and quality of data are available, enables the prediction of various soil geotechnical characteristics, potentially serving as a more economical and complementary option compared to the traditional acquisition of data solely through laboratory tests of Resilience Modulus necessary for pavement design. The main objective of this work is to develop neural models using artificial intelligence to be applied in pavement projects in the State of Ceará. For this purpose, databases containing geotechnical information of pavements in the State of Ceará were collected. In total, the databases contain over a thousand records covering soil physical properties, California Bearing Ratio, and AASHTO classification information. All this data comes from projects at the Federal University in partnership with the National Department of Transportation Infrastructure. Through the use of Artificial Neural Networks, neural models were developed to predict Resilience Modulus values,

com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Através da utilização de Redes Neurais Artificiais foi possível desenvolver modelos neurais para previsão de valores de Módulo de Resiliência, a maior parte desses modelos atingiu valores de correlação acima de 0,7, sugerindo uma relação significativa entre as variáveis utilizadas para estimar valores de Módulo de Resiliência. O modelo mais representativo teve um valor de 0,86. Isso destaca a promissora facilidade e aplicabilidade dos modelos neurais na previsão do Módulo de Resiliência para o dimensionamento empírico e empírico-mecanístico de pavimentos.

Palavras-chave: Redes Neurais Artificiais. Módulo de resiliência.

with most of these models achieving correlation values above 0.7, suggesting a significant relationship between the variables used to estimate Resilience Modulus values. The most representative model had a value of 0.86. This highlights the promising ease and applicability of neural models in predicting Resilience Modulus for empirical and empirical-mechanistic pavement design.

Keywords: Artificial Neural Networks. Resilience Module.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento geológico é essencial para a caracterização precisa dos materiais presentes em solos e rochas, desempenhando um papel estratégico no planejamento e desenvolvimento de projetos. Essa abordagem permite otimizar o uso dos recursos naturais, promovendo soluções sustentáveis e minimizando impactos ambientais negativos (Lima, 2022). Aprimorar ou modificar as condições naturais do solo para adaptação das necessidades de projetos de construções tem sido uma prática antiga, que muitas vezes resulta em redução de custos e outros benefícios tangíveis. Atualmente existem várias técnicas de melhoramento do solo abrangendo tratamentos rasos, médios e profundos do solo envolvendo drenagem, reforço, voltados a geotecnia, dependendo da construção e necessidades do projeto (Correia et al. 2016).

A geotecnia é essencial em projetos de transporte, pois a estabilidade do solo determina a segurança e durabilidade das obras. Uma caracterização adequada evita falhas estruturais e reduz impactos ambientais, prevenindo desastres relacionados a erros de análise geotécnica (Santos et al., 2020; Costa et al., 2020). Ao realizar levantamentos geológico-geotécnicos, é possível elaborar cartas geotécnicas que disponibilizam informações valiosas sobre a resistividade e a estabilidade do solo nas áreas projetadas para construção (Silveira e Reis, 2021). Países em desenvolvimento, como Brasil e Índia, no qual a grande parte do escoamento da produção e transporte de pessoas é realizado através das rodovias, esse papel é ainda mais significativo (Alves e Santarem, 2015; India, 2018).

A maioria das rodovias brasileiras possui revestimento asfáltico apoiado sobre o subleito natural e camadas de solo compactado, como base e sub-base. A geotecnia desempenha um papel essencial nessas estruturas, pois as propriedades geométricas, físicas, mecânicas e químicas dos materiais utilizados influenciam diretamente seu desempenho (Correia et al. 2021). Assim, análises geológico-geotécnicas são essenciais em contextos de desenvolvimento de infraestruturas. Estas análises contribuem para uma compreensão mais clara das condições do solo e do subsolo, prevenindo problemas que poderiam surgir devido a condições geológicas desfavoráveis (Santos et al. 2020; Costa et al. 2020).

O Brasil adota predominantemente uma abordagem empírica para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, com um método cuja origem remonta à década de 1960 (Ferreira, 2021). O CBR, que se fundamenta na relação entre a resistência do solo e a pressão aplicada, facilita decisões iniciais sobre a adequação dos materiais a serem utilizados e a configuração do pavimento (Silva et al. 2023). Sua fundamentação empírica, no entanto, limita a precisão do método, já que não abrange

a complexidade de condições variáveis de carregamento e características dos materiais modernos (Cardozo et al. 2023). Entre as deficiências desse ensaio ressalta-se que o CBR não representa o efeito real das cargas no pavimento, uma vez que não considera as tensões de confinamento e não leva em consideração a aplicação dinâmica das cargas, ocasionada pelos veículos em movimento (Nguyen et al. 2016). Além disso, esse método também não acompanha os avanços ocorridos na caracterização de materiais e apesar da relevância que desempenhou em seu início até os dias atuais, percebe-se que novos parâmetros e análises devem ser adotados incorporando características elásticas e resistivas sob diferentes condições ambientais (Mello et al. 2021).

A realização do dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos é um processo complexo, que precisa do conhecimento de variáveis de difícil previsão e modelagem. Em decorrência da dificuldade ainda presente, foi desenvolvida diversos estudos voltados à elaboração de métodos mais modernos e analíticos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, com objetivo de minimizar cada vez mais o alto teor de empirismo ainda existente nas metodologias utilizadas. Tais estudos deram origem aos métodos chamados mecanístico-empíricos (Pitangui, 2019).

O método mecanístico-empírico surge como uma alternativa mais robusta ao tradicional método baseado no CBR, pois considera de forma mais abrangente os efeitos das tensões e deformações nos pavimentos, permitindo uma previsão mais precisa do desempenho estrutural ao longo do tempo (Silva e Santos, 2021). Nesse contexto, o módulo de resiliência (MR) desempenha um papel fundamental, sendo um dos principais parâmetros utilizados para avaliar o comportamento dos solos sob carregamento do tráfego (Ribeiro et al. 2016). Além disso, a utilização do MR possibilita testar diferentes combinações de materiais em condições reais, permitindo ajustes mais eficientes na engenharia de pavimentos (Rocha et al. 2021). Assim, ao incorporar fatores como volumes de tráfego e características climáticas, o dimensionamento mecanístico-empírico amplia a precisão das análises e otimiza o desempenho das rodovias (Cardozo et al. 2023).

Apesar da utilização do Módulo de Resiliência apresentar diversos ganhos ao dimensionamento de pavimentos, em alguns casos, este método pode apresentar algumas desvantagens, entre os quais destacam-se: necessidade de maior conhecimento dos técnicos para a realização dos ensaios, normalmente com equipamentos que são onerosos com disponibilidade limitada (Sas et al. 2015; Mehrpazhouh et al. 2019). Ensaios que são mais usuais, como o índice California Bearing Ratio, possuem maior facilidade de serem realizados em maior quantidade de laboratórios, justamente por serem testes mais simples. Para a realização do ensaio do módulo de resiliência são necessárias câmaras destinadas ao ensaio triaxial de cargas repetidas que consistem em um aparato relativamente sofisticado, o que dificulta, ou até mesmo inviabiliza, o seu deslocamento e a sua utilização fora de locais adequados (Ribeiro, 2016).

No Brasil, a disponibilidade de equipamentos triaxiais de carga repetida é limitada, estando grande parte concentrada em instituições acadêmicas. Diante dessa restrição e da necessidade de estimativas do módulo de resiliência (MR) para o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos, os modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA) surgem como uma alternativa viável (Oliveira, 2024). As redes neurais artificiais (RNAs) têm se consolidado como uma ferramenta computacional essencial, inspiradas nos princípios do funcionamento do cérebro humano. Elas são projetadas para simular a forma como os neurônios biológicos processam informações, permitindo a aprendizagem a partir de exemplos, além de serem capazes de reconhecer padrões e generalizar informações baseadas em dados de entrada (Maciel et al. 2023). Essa aptidão faz com que as RNAs sejam aplicadas em uma variedade de domínios, como previsão de demanda, diagnósticos em saúde, análise financeira, entre outros setores (Caires e Simonelli, 2021). As RNA's são técnicas, amplamente utilizadas para solução de problemas não lineares e que se aplicam para diversas áreas do conhecimento, inclusive a engenharia rodoviária, com resultados satisfatórios (Celeste et al. 2019).

Diversos trabalhos recentes têm investido na aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) para prever o módulo de resiliência em diferentes

contextos. De acordo com o estudo realizado por Oliveira (2024), a aplicação de redes neurais na previsão de propriedades geotécnicas demonstrou resultados promissores. Utilizando um extenso banco de dados geotécnicos com mais de oito mil registros, a modelagem neural possibilitou prever valores de CBR e módulo de resiliência (MR) com coeficientes de correlação superiores a 0,70, alcançando 0,98 para CBR e 0,86 para MR. Em estudo realizado por Cabral et al. (2022) a Deformação Permanente (DP) e o Módulo de Resiliência (MR) de solos utilizados em pavimentos foram analisados por métodos mecanístico-empíricos e empíricos. Ensaios triaxiais de carga repetida (RLT) foram aplicados, e a modelagem foi realizada pelos métodos MeDiNa e CAP 3D-D. O uso de RNA teve destaque, cujo desenvolvimento demonstrou grande capacidade na geração de parâmetros para modelos de predição da DP nos solos estudados. Na análise conduzida por Carmo e Marques (2021) promoveu a comparação de dados reais com as previsões de RNA, evidenciando a eficácia desse método em prever o módulo de resiliência em misturas experimentais, o que constitui um avanço significativo na área de dimensionamento de pavimentos. Em investigação realizada por Paz et al. (2020) foi utilizado as redes neurais para identificar defeitos em rodovias do Estado do Ceará e foi obtido uma acurácia de 80% em seus resultados.

Este trabalho pretende contribuir para o estudo do comportamento mecânico dos solos no Estado do Ceará, por meio de estimativas de Módulo de Resiliência. Para tal, utilizou-se como ferramenta principal as RNA's, que possibilitou realizar estimativas de MR a partir de resultados de ensaios básicos, de tal forma que se possa contribuir para facilitar a utilização de métodos de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos, além de ser uma alternativa para reduzir custos e tempo de operação de ensaios mais complexos.

2. OBJETIVO

Criar modelos de redes neurais artificiais para previsão de propriedades geológico-geotécnicas para aplicações em projetos de pavimentos no Estado do Ceará.

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida no estado do Ceará, situado no Nordeste do Brasil entre meridianos 37º 14' 54" e 41º 24' 45" de longitude a oeste de Greenwich e 2º 46' 20" e 7º 52' 15" de latitude Sul. Possui extensão territorial de 146.016 km² e divide-se, atualmente, em 184 municípios. A metodologia proposta para este estudo compreende o desenvolvimento de modelos neurais para previsão de propriedades geotécnicas (MR). Os modelos de redes neurais artificiais seguiram as seguintes etapas: os procedimentos iniciais envolveram a realização do levantamento e análise do banco de dados geotécnicos de pavimentos no Estado do Ceará, posteriormente foram criados os modelos de previsão de MR para o Estado do Ceará. A figura 1 mostra o fluxograma das etapas desta pesquisa.

Figura 1: Estruturação das fases da pesquisa

Fonte: Autores

Os dados utilizados para os modelos fazem parte do Projeto da Universidade Federal do Ceará com o DNIT, denominado Pesquisa, Treinamento e Acompanhamento Técnico de Pavimentos Asfálticos Nacionais, sendo especificamente desenvolvido no Subprojeto 2 - Plataforma integrada de estruturação e análise de dados com uso de Inteligência Artificial. Além dos dados provenientes de 47 projetos de rodovias federais (BRs) arquivados no acervo de projetos do DNIT/CE, a equipe do Subprojeto 2 realizou a aquisição de estudos geotécnicos adicionais de projetos rodoviários municipais e estaduais. Essa iniciativa visava enriquecer a base de dados disponível. Nesse contexto, foram obtidos dados de vários trechos de projetos em diversas rodovias, incluindo a CE-085, CE-040, CE-010, CE-155, CE-153, CE-187, CE-388, CE 292 e a Rodovia Aracati – Canoa Quebrada.

Inicialmente o banco de dados fornecido continha o total de 1342 dados de entrada-saída contendo as informações de percentuais de solo passantes nas peneiras (1", 3/8", #4, #10, #40, #200), classificação da American Association of State

Highway and Transportation Officials (AASHTO), Limite de Liquidez (LL), massa específica seca máxima (γdmax), umidade ótima (ot), California Bearing Ratio (CBR), tensão confinante (σ3), tensão desvio (σd) e Módulo Resiliência (MR). A escolha desses parâmetros para alimentação dos modelos neurais foi baseada na relevância para a previsão do MR. Esses parâmetros são fundamentais para entender o comportamento mecânico dos solos e sua capacidade de resistir a cargas. Todos esses dados foram usados para criação dos modelos. Foram retirados do banco de dados, aleatoriamente 268 exemplos, usados na fase de validação dos modelos, que corresponde a 20% do conjunto e 1073 exemplos utilizados para treinamento, que corresponde a 80% dos dados. Ao total foram criados 6 modelos diferentes, variando-se os dados de entradas e arquiteturas para cada modelo, sendo o Módulo de Resiliência comum a todos como dado de saída. A distribuição geográfica dos pontos de coleta desses dados é apresentada na Figura 2.

Para a criação dos modelos de previsão das variáveis de Módulo de Resiliência foi empregado como ferramenta as Redes Neurais Artificiais, foi utilizado o software QNET 2000, em sua versão demo. O QNET é um programa perceptron multicamadas que utiliza o algoritmo de retropropagação do erro para o treinamento da rede neural artificial. O programa admite até oito camadas intermediárias de neurônios e a escolha entre quatro funções distintas de ativação (sigmóide, gaussiana, secante hiperbólica e tangente hiperbólica (Dantas Neto, 2004). Em geral, não há regras para a escolha da função de ativação a ser empregada no modelo de redes neurais, a escolha da função mais adequada é feita por tentativas e erros, ou seja, a que apresentar resultado mais satisfatório, nesta pesquisa a função que melhor apresentou resultados foi a função sigmóide, a equação dessa função é apresentada a seguir:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

Onde
σ(x): Representa a saída da função sigmóide, um valor entre 0 e 1.
x: Representa a entrada da função, que pode ser qualquer valor real.
e^{-x} : É a base do logaritmo natural

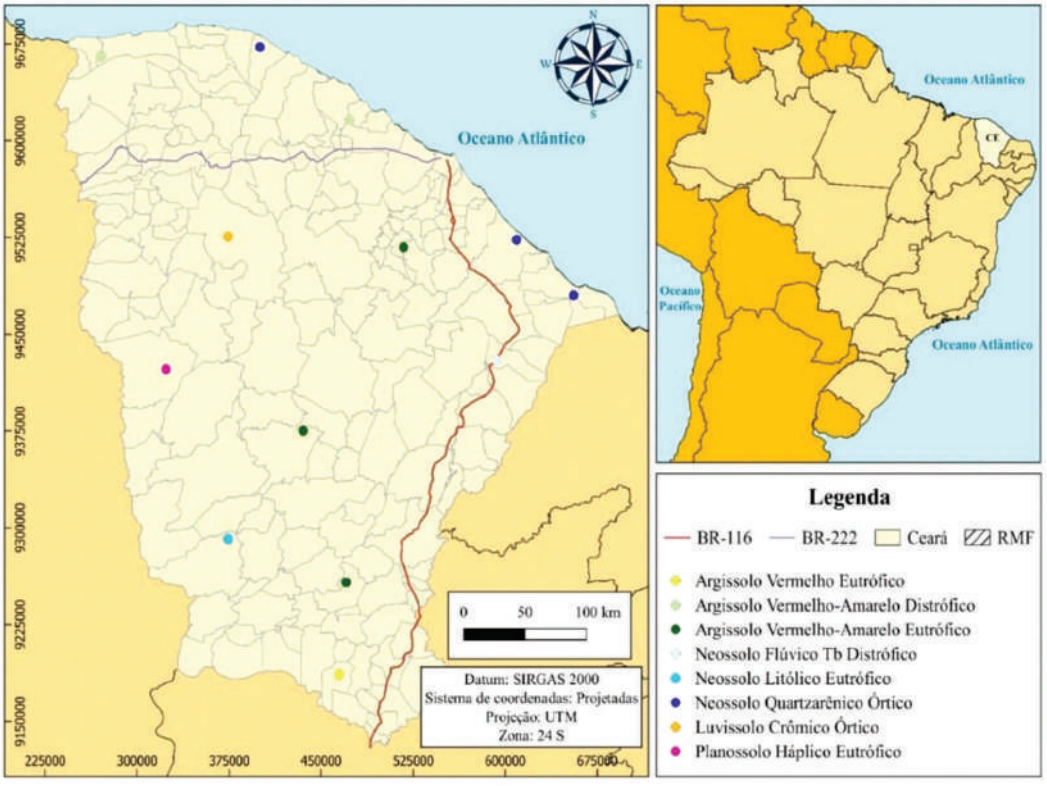


Figura 2: Localização do estado do Ceará e dos pontos de coleta do Módulo de Resiliência

Fonte: Elaborado pelos autores.

O QNET 2000 proporciona a modelagem por duas fases: treinamento e validação. Para realização do treinamento é necessário escolher dois parâmetros para ajustar os pesos sinápticos wkj: η (taxa de aprendizagem) que afeta no processo de convergência do algoritmo de retropropagação dos erros; e o fator α (momentum), que diminui a fragilidade do algoritmo durante essa convergência. Estes parâmetros manipulam o algoritmo de retropropagação na regulagem dos pesos sinápticos (wkj). O fator α correlaciona-se com a estabilidade do algoritmo de retropropagação, geralmente adotado entre 0,8 e 0,9 (Dantas Neto, 2004). Neste trabalho adotou-se os valores de 0,8 para o fator α e para a taxa de aprendizagem η variando entre 0,001 e 0,15. Dessa forma de adoção de η permite que o programa otimize os valores aprendizagem fazendo-se a fase de treinamento com maior rapidez e minimizando o risco de não convergência numérica Araújo (2015).

O programa QNET 2000 admite a mudança desses parâmetros a qualquer momento da fase de treinamento melhorando a eficiência, porém neste trabalho apenas o valor de η foi variado dentro de uma faixa determinada durante o treinamento e o fator α foi mantido constante. Antes de iniciar a fase de treinamento foi feito o tratamento dos dados, para tal, realizou-se a normalização das variáveis. É necessária esta normalização, tendo em vista que, as diferentes funções de ativação que realizam o cálculo dos neurônios fornecem valores dentro de um intervalo. Essa etapa também pode ser realizada no próprio programa, mas apresenta desvantagens pois omite informações dos dados de entrada impedindo a implementação do modelo em planilhas de cálculo (Dantas Neto, 2004).

Inicialmente os dados oriundos dos ensaios geotécnicos passaram por um pré-processamento para que se adequassem às restrições impostas pela modelagem neural no QNET 2000. Esse procedimento foi realizado da seguinte forma: numerização e normalização dos dados. A numerização compreendeu em se atribuir um valor decimal aos dados que possuem valores alfanuméricos (variáveis qualitativas) proveniente de ensaios geotécnicos de laboratório como: o Índice de Plasticidade (IP), o Limite de Liquidez (LL) e a Classificação da AASHTO, esta etapa foi realizada para todos os modelos, abaixo é apresentado uma tabela de exemplo desta etapa. A Tabela 1 apresenta um exemplo de numerização dos dados alfanuméricos.

Após numerização dos dados foi realizada a normalização, no qual consiste em transformar os valores decimais em valores limitantes de uma determinada função. Os valores dos dados de entrada e saída foram normalizados entre 0,15 e 0,85, considerando uma relação linear entre os valores de mínimos e máximos de cada uma das variáveis ligadas utilizando a Equação 1. A Tabela 2 mostra os valores máximos e mínimos das variáveis de Módulo de Resiliência. Na Tabela 3, é possível observar um exemplo de normalização dos dados com todos os resultados dos ensaios em valores decimais e em valores normalizados.

Tabela 1: Exemplo da numerização dos dados

Variável	Dados Alfanuméricos	Numerizado
LL	NP	0
IP	NP	0
Classificação AASTHO	A-1-A	1,1
	A-1-B	1,2
	A-2-4	2,4
	A-2-6	2,6
	A-3	3
	A-4	4
	A-6	6

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2: Valores máximos e mínimos das variáveis envolvidas na modelagem com utilização das redes neurais artificiais para Módulo de Resiliência

DADOS DE ENTRADA	MÁXIMO	MÍNIMO
OT (%)	17	4,2
DEN (g/cm³)	2,19	1,65
CBR (%)	114	3,8
EXP (%)	5	0
LL (%)	46	0
IP (%)	16,7	0
25,4 (#1″)	100	80
9,5 (#3/8″)	100	40
4,76 (#10)	100	22
2 (#10)	100	18
0,42 (#40)	89	14
0,0074 (#200)	71	5
σ3	0,137	0,021
σd	0,412	0,021
CLASIFICAÇÃO AASHTO	7,5	1,1
DADO DE SAÍDA MR	2038	50,069

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 3: Exemplo de normalização dos dados de MR

Variável	Valor Decimal	Valor Normalizado
OT (%)	14,92	0,74
DEN (g/cm3)	1,93	0,51
CBR (%)	14	0,21
EXP (%)	5	0,85
LL (%)	35	0,68
IP (%)	5,7	0,39
25,4	100	0,85
9,5	96	0,79
4,76	94	0,78
2	92	0,67
0,42	70	0,52
0,074	40	0,85
Classificação AASHTO	4	0,85
σ3	0,137	0,46
σd	0,412	0,26
MR	385	0,85

Fonte: Elaborado pelos autores.

$$\frac{X' - 0{,}15}{0{,}85 - 0{,}15} = \frac{X - X_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}} \quad (1)$$

Onde:
X' = Variável resultante da normalização;
X = Variável a ser normalizada;
X_{MIN} = Valor mínimo da variável a ser normalizada;
X_{MAX} = Valor máximo da variável a ser normalizada.

Foi realizado o teste com várias arquiteturas distintas, alterando o número de camadas, ou de neurônios em função dos resultados obtidos na fase de treinamento e validação. O critério para interromper ou pausar a modelagem baseou-se na observação do comportamento dos valores de correlação durante as fases de treinamento e validação. Se, em qualquer ponto do processo de modelagem, os valores de correlação caírem abaixo do limite de 0,70, a respectiva modelagem é descartada. Posteriormente, um novo modelo com maior número de iterações é construído, até atingir um valor de correlação igual ou superior a 0,70. A seleção do modelo mais eficiente foi baseada nos valores do coeficiente de determinação (R^2) e na redução do número de parâmetros de entrada. As estimativas do módulo de resiliência foram obtidas considerando σ_3 = 0,051 MPa e σd = 0,103 MPa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para as previsões do MR, inicialmente, foram desenvolvidos seis modelos distintos, alternando as variáveis de entrada e o número de neurônios na camada intermediária de cada modelo. Os resultados dos diferentes modelos dessas estimativas foram organizados de forma a possibilitar sua interpretação e análise. Para alguns modelos (M2, M5 e M6) foram testadas várias arquiteturas até atingir valores de coeficiente de correlação na validação acima de 0,7. Ao longo das fases de treinamento e validação, o programa QNET2000 concede várias informações, entre elas estão os valores das correlações entre os valores calculados e os medidos, que serão denominadas de Rt para o treinamento e Rv para a validação. Além disso, o programa também fornece informações relevantes acerca da influência relativa de cada variável de entrada nos modelos desenvolvidos, expressa em termos de percentual de contribuição. Essa funcionalidade permite identificar quais propriedades exercem maior impacto na predição do MR, auxiliando na interpretação e aplicação prática dos modelos.

De posse dessas informações correspondentes aos modelos M2, M5 e M6 desenvolveu-se gráficos que abrangem como se deu a evolução dos valores de correlação para o treinamento e validação com o número de iterações. Na Tabela 4 são indicados os valores de correlação para as etapas de treinamento e validação dos modelos neurais desenvolvidos, além das arquiteturas de rede.

Tabela 4: Valores das correlações de acordo com cada modelo de MR

Modelo	Arquitetura	Correlação Treinamento	Correlação Validação
M1	A:15-17-15-10-9-1	0,98	0,92
M2	A:11-15-7-5-1	0,88	0,73
M3	A:10-14-5-3-1	0,97	0,86
M4	A:7-15-5-5-1	0,98	0,88
M5	A:7-15-11-9-5-1	0,98	0,86
M6	A:13-15-14-13-11-8-1	0,93	0,73

Fonte: Elaborado pelos autores.

O modelo M1 para estimação individual do MR apresentou as seguintes camadas de entradas: OT, DEN, CBR, EXP, LL, IP, (P25,4), (P9,5), (P4,76), (P2), (P0,42), (P0,074), σ3, σd e Class. O Gráfico 1 mostra a comparação entre os valores de correlação obtidos para esse modelo. A variável de maior influência para o modelo M1 pertence às faixas granulométricas e percentual que passa na peneira de 0,042mm com 13,63% seguido do percentual que passa na peneira 0,074mm com 12,44% e umidade ótima com 11,33%. Para este modelo a variável de menor impacto foi a classificação AASHTO. Os percentuais de contribuição das variáveis estão apresentados no Gráfico 2.

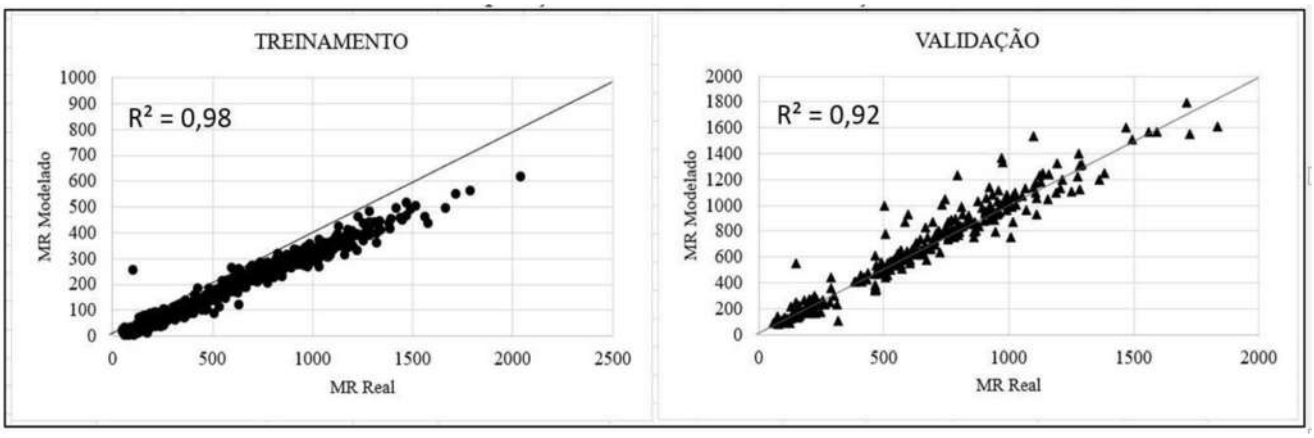


Gráfico 1: Comparação do treinamento e validação do modelo M1

Fonte: Elaborado pelos autores.

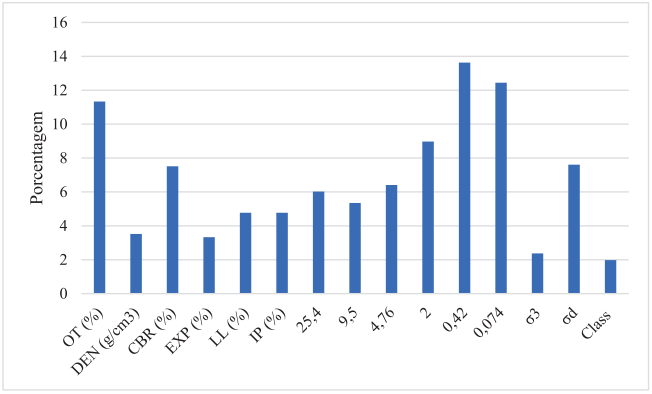


Gráfico 2: Percentual de contribuição das variáveis de entrada do modelo M1

Fonte: Elaborado pelos autores.

O modelo M2 para estimativa individual do MR utilizou como dados de entrada as seguintes variáveis: DEN, CBR, (P25,4), (P9,5), (P4,76), (P2), (P0,42), (P0,074), σ3, σd e Class. O Gráfico 3 mostra os valores de correlação e o comparativo entre os valores reais e os modelados nas fases de treinamento e validação. Comparando o número de iterações nas fases de treinamento e validação, o maior valor de correlação para a validação foi obtido com dez mil iterações (Gráfico 4). Quanto ao percentual de contribuição a variável de maior influência para o modelo M2 foi a densidade com 25,64% seguido da classificação AASHTO com 14,18% e a tensão confinante com 10,37%. Para este modelo a variável de menor impacto foi o percentual que passa na peneira de 2mm. Os percentuais de contribuição das variáveis estão apresentados no Gráfico 5.

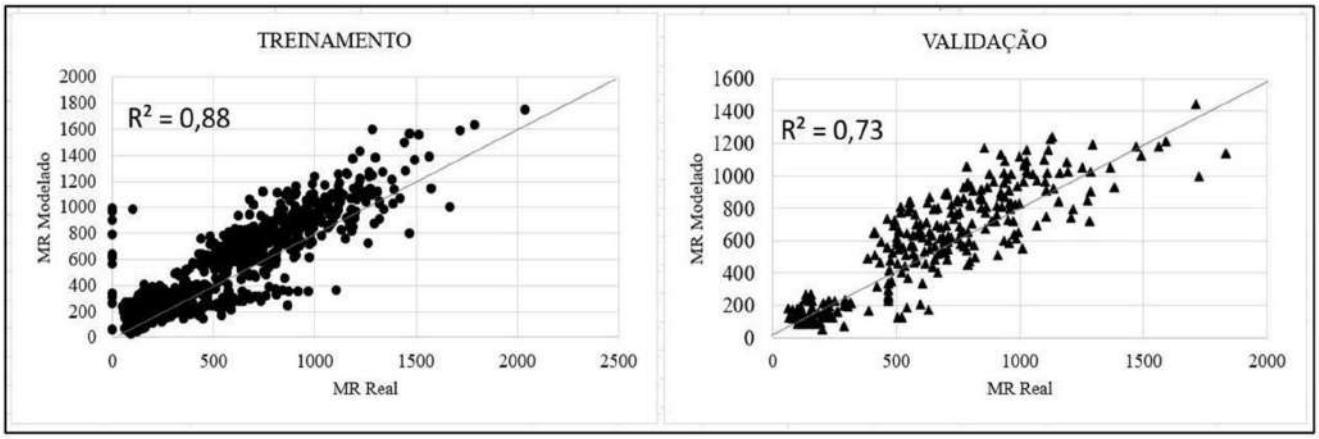


Gráfico 3: Comparação do treinamento e validação do modelo M2

Fonte: Elaborado pelos autores.

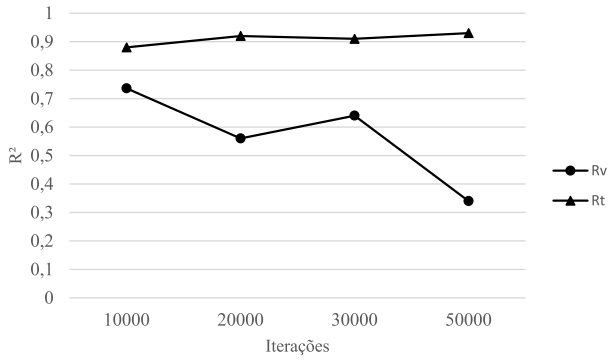


Gráfico 4: Evolução das correlações com número de iterações na fase de treinamento e validação do modelo com arquitetura

Fonte: Elaborado pelos autores.

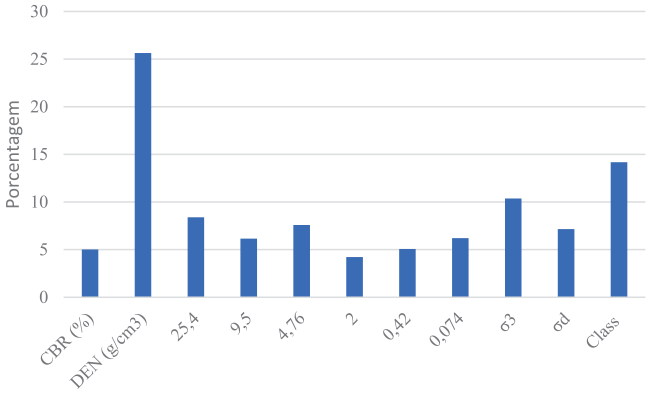


Gráfico 5: Percentual de contribuição das variáveis de entrada do modelo M2

Fonte: Elaborado pelos autores.

O modelo M3 utilizou dez variáveis de entrada: OT, DEN, (P25,4), (P9,5), (P4,76), (P2), (P0,42), (P0,074), σ3 e σd. As variáveis de maior influência para o modelo M3 foram os percentuais que passam na peneira de 9,5mm com 16,39% seguido do percentual que passa na peneira 0,074mm com 13,98% e o percentual da peneira de 2mm com 11,36%. Para este modelo a variável de menor impacto foi a tensão de confinamento (σ3). A seguir, são apresentados os valores de correlação obtidos para esse modelo (Gráfico 6) e os percentuais de contribuição das variáveis de entrada (Gráfico 7).

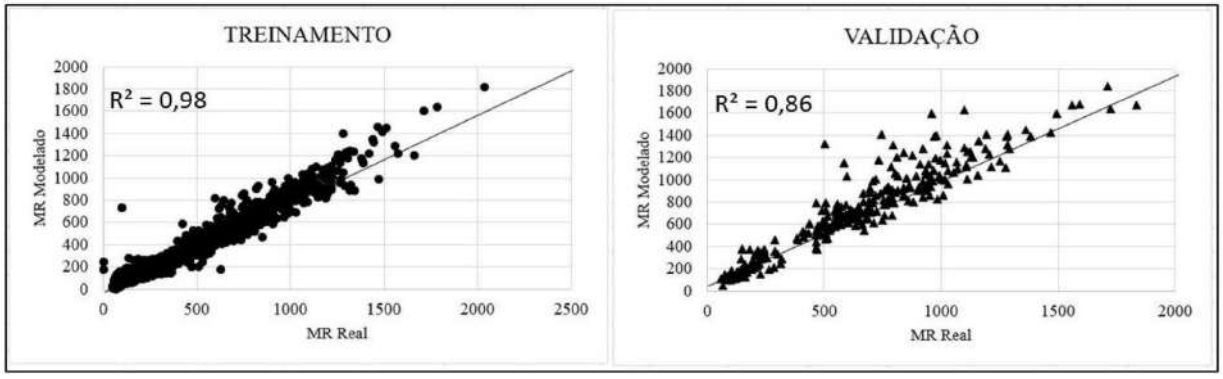


Gráfico 6: Comparação do treinamento e validação do modelo M3

Fonte: Elaborado pelos autores.

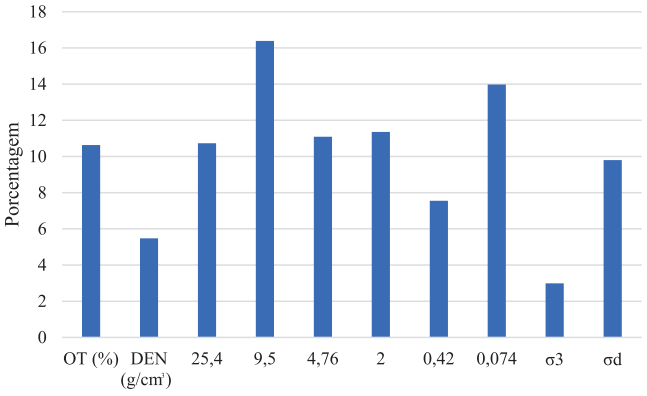


Gráfico 7: Percentual de contribuição das variáveis de entrada do modelo M3

Fonte: Elaborado pelos autores.

O modelo M4 utilizou 7 variáveis de entrada: OT, DEN, (P9,5), (P2), (P0,074), σ3 e σd. A variável de maior influência para o modelo M4 foi a umidade ótima com 18,67% seguido da tensão de desvio (σd) com 18,32% e percentual passante na peneira de 0,074mm com 16,14%. Para este modelo a variável de menor impacto foi a tensão confinante (σ3). Os valores de correlação obtidos para esse modelo são apresentados no Gráfico 8 e os percentuais de contribuição das variáveis de entrada no Gráfico 9.

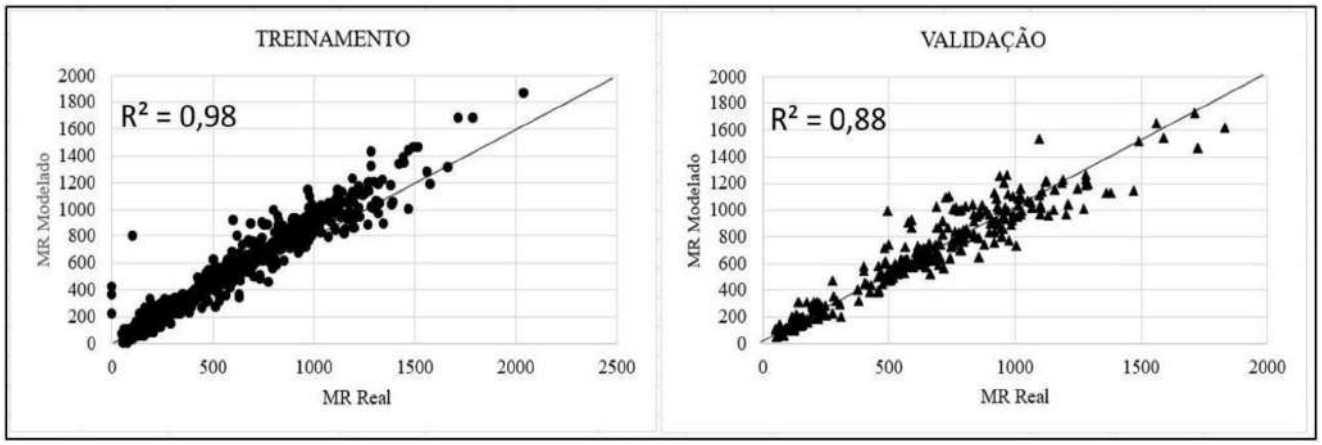


Gráfico 8: Comparação do treinamento e validação do modelo M4

Fonte: Elaborado pelos autores.

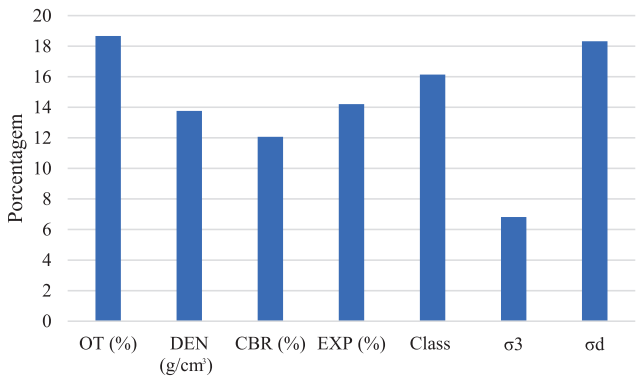


Gráfico 9: Percentual de contribuição das variáveis de entrada do modelo M4

Fonte: Elaborado pelos autores.

O modelo M5 para estimativa utilizou as seguintes variáveis de entrada: OT, DEN, CBR, EXP, σ3, σd e Class. O maior valor de correlação na fase de validação foi alcançado com 800.000 iterações. Observou-se que, conforme o número de iterações aumentava, os coeficientes de correlação também se elevavam em ambas as fases, indicando melhor desempenho do modelo. Em relação à contribuição das variáveis, a mais influente foi a tensão de desvio (σd), com 22,3%, seguida da classificação AASHTO (21,68%) e do CBR (18,19%). A variável de menor impacto foi a tensão de confinamento (σ3). Na sequência, estão apresentados os resultados referentes aos valores de correlação, ao comportamento do número de iterações nas fases de treinamento e validação, bem como os percentuais de contribuição das variáveis (Gráficos 10, 11 e 12).

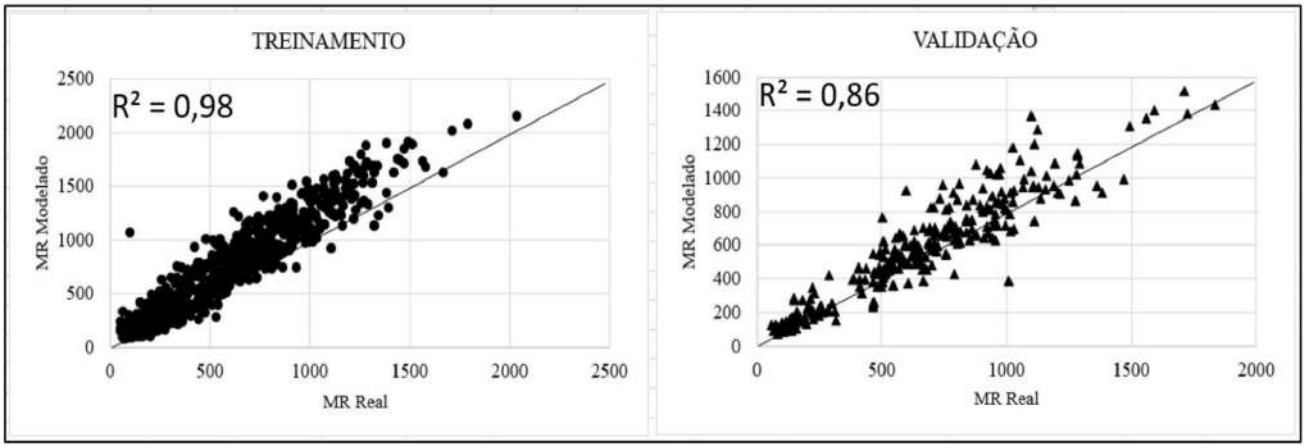


Gráfico 10: Comparação do treinamento e validação do modelo M5

Fonte: Elaborado pelos autores.

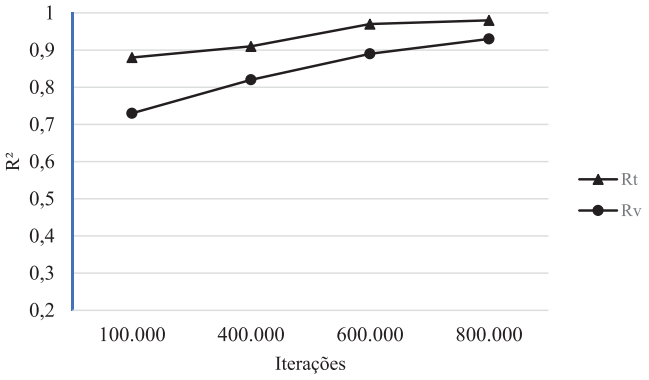


Gráfico 11: Evolução das correlações com número de iterações na fase de treinamento e validação do modelo com arquitetura

Fonte: Elaborado pelos autores.

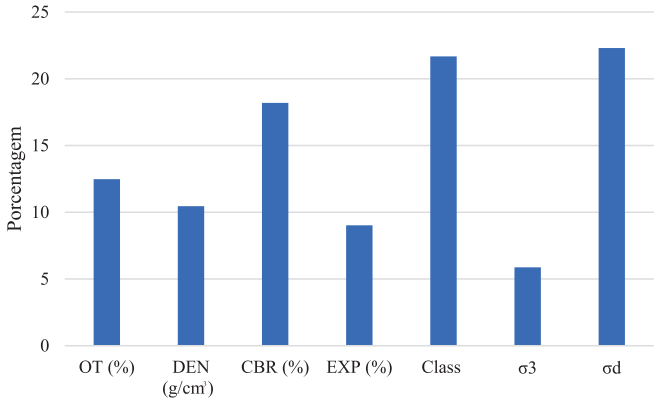


Gráfico 12: Percentual de contribuição das variáveis de entrada do modelo M5

Fonte: Elaborado pelos autores.

O modelo M6 utilizou 15 variáveis de entrada: OT, DEN, CBR, EXP, (P25,4), (P9,5), (P4,76), (P2), (P0,42), (P0,074), σ3, σd e Class para a estimativa do Módulo de Resiliência. O Gráfico 13 mostra os valores de correlação obtidos para esse modelo. Comparando o número de iterações nas fases de treinamento e validação, foi possível perceber que o maior valor de correlação para a validação foi obtido com quatrocentos mil iterações. Na fase de validação, após aumentar o número de iterações superiores a quatrocentos mil, os valores de correlação foram mais baixos, conforme mostra o Gráfico 14. Para os percentuais de contribuição as variáveis de maior influência para o modelo M6 foram os percentuais que passam na peneira de 4,76mm com 22,16% seguido do percentual que passa na peneira 25,4mm com 11,21% e o percentual da peneira de 0,074mm com 9,08%. Para este modelo a variável de menor impacto foi a expansão com 3,34%. O Gráfico 15 apresenta os valores de contribuição das variáveis.

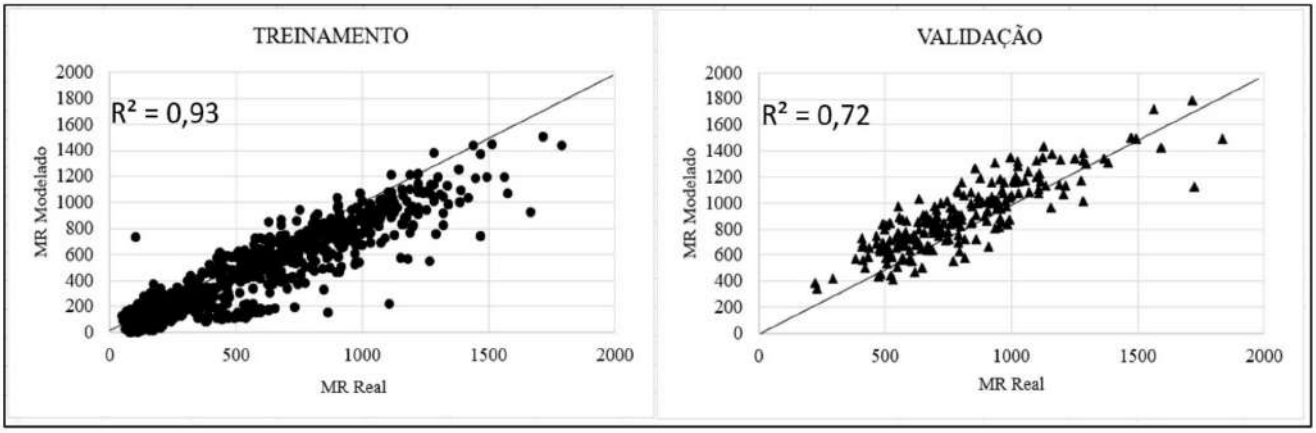


Gráfico 13: Comparação do treinamento e validação do modelo M6

Fonte: Elaborado pelos autores.

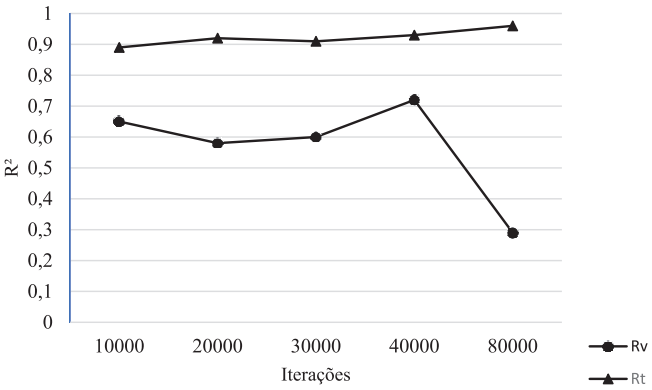


Gráfico 14: Evolução das correlações com número de iterações na fase de treinamento e validação do modelo com arquitetura

Fonte: Elaborado pelos autores.

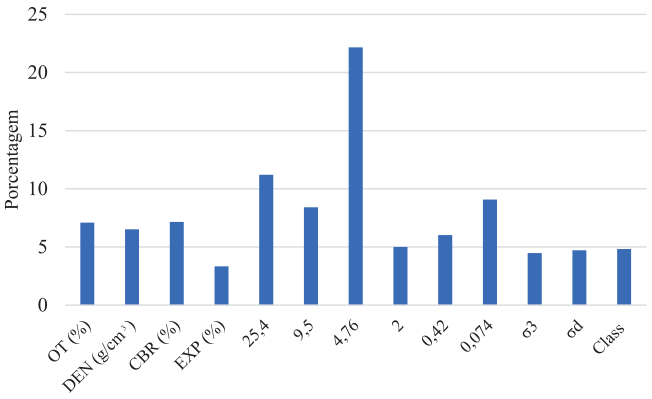


Gráfico 15: Percentual de contribuição das variáveis de entrada do modelo M6

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após toda a etapa de modelagem, obtenção dos valores correlação e variáveis de contribuição de cada modelo, foi elaborado um histograma que demonstra a comparação entre os valores da modelagem na validação. Dentre todos os dados analisados, destacou-se o M1 que foi o valor de correlação mais elevado. Também é importante ressaltar que os modelos M3, M4 e M5 demonstraram valores de correlação mais estáveis. Esses três modelos foram caracterizados pela menor quantidade de variáveis de entrada e todos acima de 0,70 na validação. O gráfico 16 apresenta esses resultados de forma mais clara.

Os dois modelos neurais que tiveram os maiores valores de correlação na validação foram M1 e M4, com 0,92 e 0,88 respectivamente. Vale ressaltar que, o modelo M4 destacou-se pois teve a menor quantidade de dados de entrada, o que representa um modelo que requer menos ensaios e maior facilidade para sua determinação. O modelo M1 apresentou o maior valor de correlação, porém foi o modelo com o maior número de dados de entrada, cada uma dessas entradas corresponde a um ensaio laboratorial, o que pode tornar o processo mais oneroso e demorado, devido à necessidade de múltiplos ensaios para a definição das camadas.

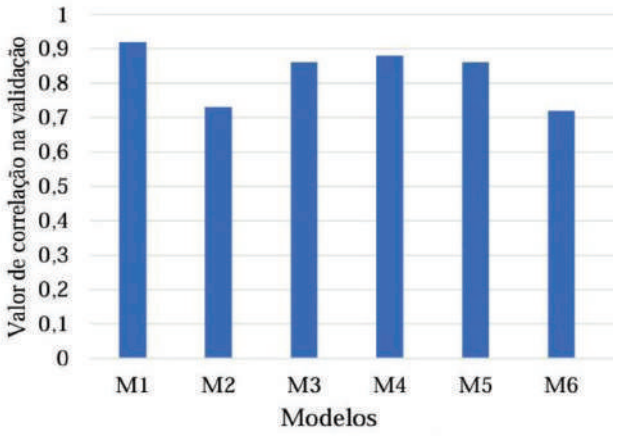


Gráfico 16: Histograma dos valores de correlação para cada modelo de MR

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observou-se que os modelos M1 e M4 apresentaram conjuntos de variáveis com diferentes níveis de influência sobre os resultados. Apesar de a maioria das variáveis de maior contribuição serem distintas entre os modelos, destaca-se que a umidade ótima esteve presente em ambos, evidenciando sua importância no comportamento resiliente dos solos compactados. No entanto, sua significância relativa foi superior no modelo M4, sugerindo que, neste caso, as condições de compactação podem ter assumido um papel mais determinante na previsão do MR, resultados semelhantes foram encontrados por Viana et al. (2010), no qual a umidade ótima teve uma influência percentual de 15,74% na rede neural considerada ideal. Essa diferença de comportamento entre os modelos reforça a importância da análise individualizada das variáveis de entrada, considerando que sua influência pode variar conforme a arquitetura da rede e os dados utilizados no treinamento.

4. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a eficácia das redes neurais artificiais na previsão de características geotécnicas para o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos. Foram desenvolvidos seis modelos, explorando diferentes variáveis de entrada para identificar padrões relevantes, o que permitiu simplificar as abordagens e identificar novas correlações entre os dados, contribuindo para a compreensão dos padrões que influenciam o comportamento dos materiais.

Dentre os modelos analisados, o M1 apresentou o maior coeficiente de correlação na validação já na primeira tentativa de configuração. No entanto, devido à sua complexidade, não foi considerado o mais representativo. Em contrapartida, o modelo M4, apesar de uma correlação na validação um pouco menor (0,88), destacou-se pela eficiência e viabilidade, utilizando um conjunto reduzido de variáveis, como umidade ótima (OT), densidade (DEN), faixas granulométricas de polegadas, (P9,5), (2mm), (0,074mm), σ3 e σd, o que possibilitou uma abordagem mais econômica e prática, demandando um menor número de ensaios laboratoriais. Assim, o modelo M4 foi considerado o mais adequado para aplicação nesta pesquisa.

Os resultados obtidos confirmam que é possível desenvolver modelos preditivos para o módulo de resiliência em uma região específica, tornando-se uma alternativa viável para otimizar projetos de pavimentação e reduzir custos associados à obtenção desses dados exclusivamente por meio de ensaios laboratoriais. Além disso, os coeficientes de correlação obtidos nos modelos deste estudo variaram de 0,73 a 0,92, apresentando níveis de precisão compatíveis com os encontrados por Ribeiro (2016), que obteve correlações de até 0,985. Esses achados reforçam o potencial das redes neurais artificiais como ferramenta auxiliar na engenharia de pavimentos, contribuindo para uma caracterização geotécnica mais eficiente e acessível.

REFERÊNCIAS

A. Mehrpazhouh, S. N. Moghadas Tafreshi y M. Mir-zababaei, Impact of repeated loading on mechanical response of a reinforced sand. Journal of Rock Mecha-nics and Geotechnical Engineering, vol. 11, n.° 4, pp. 804-814, 2019. doi: 10.1016/j.jrmge.2018.12.013

Alves, K. D. R.; Santarem, L. M. S. 2015. Um panorama da manutenção rodoviária no Brasil e as experiências internacionais XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Outro Preto.

Araújo, C. B. C. 2015. Aplicação das redes neurais artificiais do tipo perceptron na estimativa de recalques em estacas. 2015. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Geotecnia)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Cabral, W. S.; Barroso, S. H. D. A.; Silva, S. D. A. T. 2022. Consideração da deformação permanente de solos ocorridos na região Nordeste na análise mecanística-empírica de pavimentos. Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, n. 4, p. e13096. Disponível em: http://doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1396. Acesso em: 2 abr. 2025.

Caires, K. V. L; Simonelli, G. 2021. Forecasting the Brazilian demand for biodiesel using artificial neural networks. Research, Society and Development, [S. l.], v. 10, n. 5, p. e17410513381. DOI: 10.33448/rsd-v10i5.13381. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/13381. Acesso em: 3 apr. 2025.

Cardozo, L. G. E; Resende, D. C. C; Silva, N. A. B. 2023. Empirical and empirical-mechanistic dimensioning: Impact cracked area and on the project period of flexible pavements. Research, Society and Development, [S. l.], v. 12, n. 7, p. e11612742543. DOI: 10.33448/rsd-v12i7.42543. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/42543. Acesso em: 1 abr. 2025.

Correia, A.G.; Winter, M.; Puppala, A. 2016. A review of sustainable approaches in transport infrastructure geotechnics. Transp. Geotech. 7, 21–28.

Correia, António Gomes et al. 2021. A geotecnia nos pavimentos e vias-férreas e prospetivas para a era digital. Geotecnia, n. 152, p. 113-141, 2021.

Costa, M. C. A. d., Costa, B. C. A. d., Marques, J. A. F., e Marques, R. P. 2020. Elaboração de mapas geotécnicos a partir de relatórios de sondagem spt: georreferenciamento da região administrativa 01 do município maceió/al. Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica. https://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0548.

Dantas N, S. A. 2004. Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificadas com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutorado, publicação G.TD – 024/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 265p.

Do Carmo, C. A. T.; Marques, G. L. de O. 2021. Avaliação comparativa de propriedades mecânicas de misturas asfálticas simples e compostas / Comparative evaluation of the mechanical properties of simple and composite asphalt mixtures. Brazilian Journal of Development, [S. l.], v. 7, n. 8, p. 84306–84329. DOI: 10.34117/bjdv7n8-579. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/35033. Acesso em: 1 apr. 2025.

Ferreira, A. D. 2021. Comparação entre método empírico e mecanítico-empírico para dimensionamento de pavimentos flexíveis. In: 7º Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Evento Virtual, 2021.

FHWA Federal Highway Administration. 2014. Speed Concepts: Informational Guide. US DOT. https://safety.fhwa.dot.gov/speedmgt/ref_mats/fhwasa10001.

Honarmand-ebrahimi, Ali. Regression and neural network modeling of resilient modulus based on routine soil properties and stress states. The University of Oklahoma, 2006.

India, G. 2018. Basic Road Statistics of India. 2015-16. Ministry of Road Transport and Highways: New Delhi.

Lima, K. D. M. Estudo de caso: análise qualitativa e quantitativa de material granular para a pavimentação na região de Goiânia. 2021. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológio de Goiás - Campus Goiânia, Goiânia, 2022.

Maciel, R. S.; Costa, T. de O.; Colen, F.; Maia, N. A.; Pereira, S.; Baraúna, E. E. Pereira; Baldin, T.; De Souza, L. H. Previsão da temperatura interna de um forno de carvão de alvenaria utilizando rede neural artificial do tipo LSTM. CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES, [S. l.], v. 16, n. 8, p. 8472–8485, 2023. DOI: 10.55905/revconv.16n.8-016. Disponível em: https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/1047. Acesso em: 3 abr. 2025.

Mello, L. B.; Chiarello, G. P.; Pascoal, P. T.; Baroni, M.; Specht, L. P. Solo-brita em bases de pavimentos flexíveis: avaliação quanto à fadiga utilizando o MEDINA. Anuário do Instituto de Geociências, v. 44, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_35192. Acesso em: 2 abr. 2025.

Motta, L. M. G. (1991) Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis: Critério de Confiabilidade e Ensaios de Cargas Repetidas. Tese de Doutorado.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Nguyen, B. T.; Mohajerani, A. 2016. Resilient modulus of fine-grained soil and a simple testing and calculation method for determining an average resilient modulus value for pavement design. Transportation Geotechnics, v.7, p.59-70.

Oliveira, F. C. H. P. Desenvolvimento de modelos neurais e mapas geológico-geotécnicos para pavimentação no estado do Ceará. 2024. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Pitangui, L. C. 2019. Análise comparativa do método do DNER com o método mecanístico-empírico MeDiNa. Monografia (especialização) – Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 93 p.

Ribeiro, A. J. A. 2016. Um modelo de previsão do módulo de resiliência dos solos no estado do Ceará para fins de pavimentação. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Rocha, M. L.; Marques, G. L. O.; Oliveira, T. M. 2021. Avaliação dos resíduos de construção e demolição no dimensionamento de camada reforço de pavimentos flexíveis. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 2, p. 377-393. Disponível em: https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2021.002.0033. Acesso em: 2 abr. 2025.

Santos, T.A., Pinheiro, R.J.B., Specht, L.P., et al. 2020. Análise do desempenho de subleitos rodoviários à luz de conceitos da Mecânica dos Pavimentos, Revista Matéria, v.25, n.3.

Santos, A. E. M., Silva, D. d. F. S. d., Mendonça, G. A., Santos, T. V., Amaral, R. R., e Silva, L. A. M. 2020. Índice de queda de blocos e caracterização geológica-geotécnica em taludes rodoviários: um estudo de caso na br-262. Research, Society and Development, 9(12), e12891210968. https://doi.org/10.33448/rsd-v9i12.10968.

Sas, W., Gluchowski, A., Gabrys, K., Szymanski. A. 2015. Application of cyclic CBR test for the estimation of re-silient modulus in the pavement construction. en Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development, pp. 3747-3752. doi: 10.1680/ecsmge.60678.

Silva, L. V.; Omido, T. V.; Barboza, C. S. 2023. Omido, A. R. Dimensionamento de pavimentos flexíveis: análise comparativa de custos entre diferentes métodos. REVISTA DELOS, [S. l.], v. 16, n. 46, p. 2474–2498. DOI: 10.55905/rdelosv16.n46-030. Disponível em: https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/1023. Acesso em: 1 abr. 2025.

Soares, J. B.; A. Mateos e L.M.G. Motta. 2009. Aspectos gerais de métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos de vários países e a relação com um novo método brasileiro. Revista Pavimentação (ABPv), Outubro, p. 20–35

Tarawneh, D.; Nazzal, M.D. Optimization of resilient modulus prediction from FWD results using artificial neural network. Period. Polytech. Civ. Eng. 2014, 58, 143–154.

Viana, H. M. F., Parreira, A. B., e Fabbri, G. T. P. 2010. Análise das Relações entre o Módulo de Resiliência e as Propriedades dos Solos Grossos à Luz das Redes Neurais Artificiais. Anais.

CONTRIBUIÇÃO E REFLEXÃO

A RBGEA abre esse espaço para que os membros de nossa comunidade tenham divulgados suas ideias, pensamentos e opiniões sobre temas e assuntos relacionados à Geologia de Engenharia e Ambiental.

Esperamos com estes textos iniciar debates e discussões e por isso questionamentos, perguntas, opiniões serão muito bem vindas.

OS DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS NATURAIS NAS ENCOSTAS DA SERRA DO MAR – DIAGNÓSTICO DO FENÔMENO

ÁLVARO RODRIGUES DOS SANTOS
Geólogo, Consultor, santosalvaro@uol.com.br

A imponente escarpa da Serra do Mar, responsável, por obséquio de sua topografia acidentada, pela conservação do pouco que nos resta da Mata Atlântica na região sudeste brasileira, cumpre uma espetacular função ambiental, determinante na equação climática regional. Claro, além de sua importância cênica, ecológica, turística, histórica e cultural. Essa escarpa serrana, que desde tempos pré-coloniais impõe uma enorme dificuldade de transposição para homens e cargas na ligação litoral-interior, tem origem tectônica por reativação da Falha de Santos, ocorrida ao final do Cretáceo, há cerca de 65 milhões de anos, a uma distância, mar adentro, de perto de 60 Km da atual orla litorânea do sudeste brasileiro. A escarpa ocupa sua atual posição geográfica fruto de um prolongado processo de regressão erosiva.

Preteritamente, desde o início do período Terciário, em ocasião de paleoclimas áridos com chuvas torrenciais, ambiente geológico em que a cobertura vegetal se recolhia a pequenos refúgios (Aziz Ab'Saber), os solos então formados durante o clima quente/úmido, e então desprotegidos, eram lavrados violentamente por em eventos pluviométricos intensos, conformando momentos geológicos de acelerada regressão geomorfológica da escarpa.

Em intervalos geológicos e climáticos quentes e úmidos, como o atual, quando estabelece-se o domínio pleno da floresta atlântica (floresta ombrófila densa), a regressão erosiva da escarpa da Serra do Mar desacelera-se, dando-se apenas restritamente como consequência de deslizamentos isolados em episódios de chuvas intensas, e, em maiores períodos de recorrência, por miríade de deslizamentos concomitantes em eventos de elevada pluviosidade concentrada. Em ambos os casos, obedecendo o mesmo padrão pluviométrico: alguns dias de chuvas ininterruptas (chuvas de saturação) culminados por um episódio pluviométrico de grande intensidade (chuva de deflagração). Mas, em termos de capacidade de movimentação de solos, na atual condição climática pode-se dizer que o processo mais radical de erosão regressiva da escarpa apresenta-se contido, latente, como conseqüência da espetacular proteção proporcionada pela floresta.

O PRINCIPAL TIPO DE MOVIMENTO DE MASSA NATURAL NAS ENCOSTAS DA SERRA DO MAR

O principal tipo de deslizamento **natural** na Serra do Mar, por sua distribuição e freqüência, é o **translacional raso ou planar.**

Esses deslizamentos mobilizam quase que exclusivamente o horizonte superior de solos superficiais. Somente eu sua "raiz", ou seja, no local de sua origem/início, há**,** eventualmente**,** mobilização de materiais do horizonte imediatamente inferior de solo de alteração de rocha, saprolítico. São os deslizamentos translacionais rasos, por sua grande área de distribuição e pela freqüência de ocorrência, aqueles que devem inspirar o maior cuidado para os empreendimentos humanos que se façam necessários na Serra do Mar. O mapeamento de sua ocorrência pretérita (cicatrizes) ou atual representa o melhor indicador das regiões mais instáveis das encostas serranas.

Vale registrar que na Serra do Mar, como em todas regiões serranas tropicais úmidas, deslizamentos rotacionais clássicos, como também movimentações de corpos de tálus, não ocorrem de forma natural. Ou seja, somente ocorrem quando associados a intervenções humanas.

A Geologia de Engenharia brasileira proporcionou nas últimas décadas um considerável avanço da compreensão da dinâmica evolutiva desse tipo de deslizamento, atingindo o que se pode considerar um estágio avançado de conhecimentos, informando adequadamente, a todo tipo de atividade humana interessada, sobre **onde**, **quando** e **como** esses deslizamentos ocorrem.

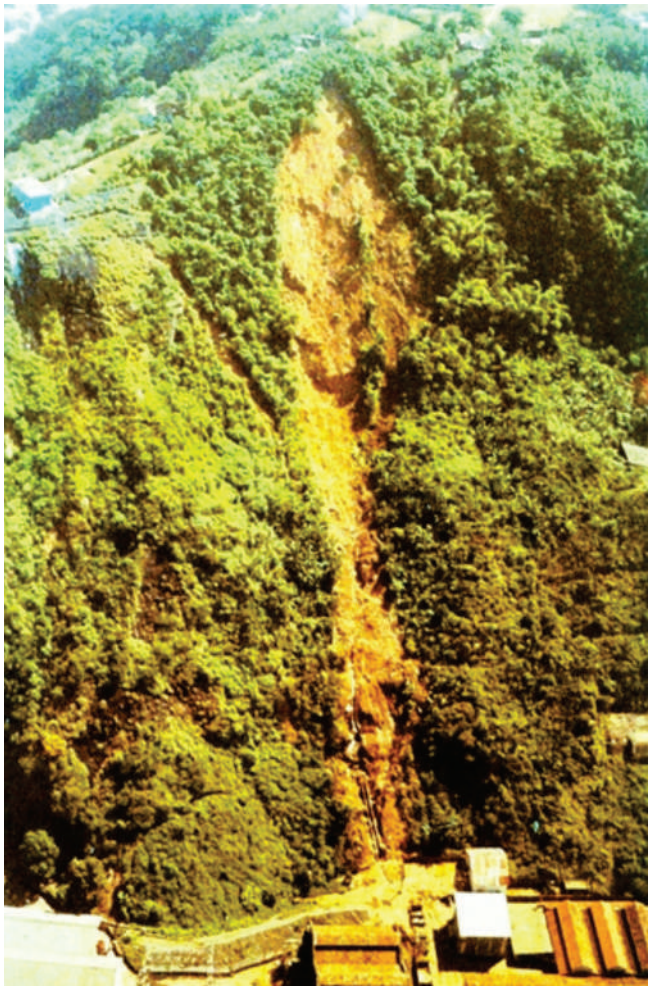


Figura 1: Escorregamento Translacional Raso (ou Planar) típico. Local: Morros de Santos e São Vicente. Notar a proximidade da "raiz" da crista do espigão e a pouca profundidade dos solos superficiais mobilizados. (Foto Arquivo IPT).

Aspectos que chamaram a atenção na observação dos deslizamentos translacional raso e que orientaram os estudos a respeito

- Sistemática proximidade da raiz (parte superior) do deslizamento da crista de espigões;
- preferencialidade por encostas retilíneas;
- probabilidade de ocorrência já a partir de declividades de 35º a 40º;
- não existe uma superfície de ruptura nos moldes clássicos, o que há é um colapso dos parâmetros de resistência gerando uma condição de desmonte hidráulico.

SEÇÕES ESQUEMÁTICAS TÍPICAS DOS DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS NA SERRA DO MAR

Figura 2: A raiz constitui o "centro nervoso" do deslizamento. Aí, e só aí, acontecem os fenômenos hidráulicos e geotécnicos que na verdade determinam o desenvolvimento ou não do fenômeno. A profundidade alcançada na raiz é sempre superior àquela apresentada no corpo do escorregamento. Via de regra, na raiz são também mobilizados materiais envolvendo o solo saprolítico. O corpo do escorregamento é mobilizado pelo arraste promovido pelo material proveniente do "desmonte hidráulico" da raiz. Ou seja, não há uma superfície de ruptura clássica entre o corpo do escorregamento e o maciço.

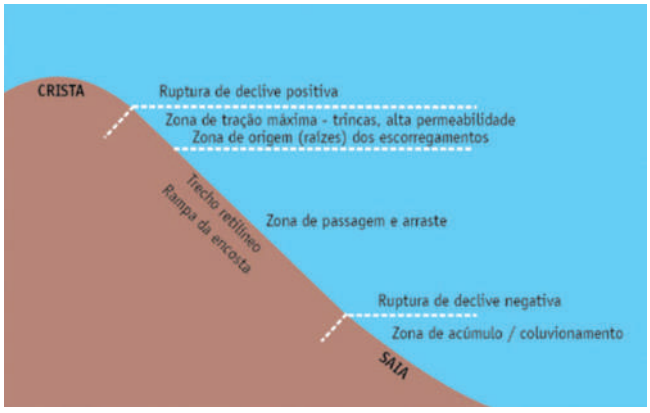


Figura 3: O deslizamento translacional raso é um dos únicos movimentos de massa naturais nas encostas da Serra do Mar. Ou seja, pode ocorrer sem a participação do homem. O mapeamento de sua maior ou menor incidência natural revela as zonas da Serra de maior ou menor instabilidade potencial. Hoje, sua dinâmica, ou seja, o onde, o quando e o como ocorrem, está adiantadamente equacionada, o que, juntamente com outros conhecimentos geotécnicos correlatos da Serra, proporciona informações suficientes para que as obras de engenharia na Serra sejam corretamente projetadas e construídas, e, portanto, coroadas de sucesso.

Figura 4: Imagens dos catastróficos eventos ocorridos no ano de 1967 em Caraguatatuba – SP (acima) e Serra das Araras – RJ (abaixo), tragédias que levaram à morte mais de 2.000 brasileiros. Os fenômenos típicos de eventos dessa escala de grandeza não constituem um tipo diferenciado de deslizamentos, mas sim a conjunção de milhares de deslizamentos translacionais rasos (planares) naturais e induzidos, cuja dinâmica é descrita adiante. Observar a constante proximidade das raízes dos deslizamentos das cristas dos espigões. A confluência do material terroso, rochoso e vegetal resultante desses deslizamentos para talvegues de vales provocaram várias corridas de detritos com enorme e trágico poder destrutivo. Foto acima, Arquivo Nelson Infanti, foto abaixo, Geological Survey Professional Paper 697.

DIAGNÓSTICO. A GEOLOGIA DE ENGENHARIA DIZ ONDE, QUANDO E COMO OCORREM OS ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS NA SERRA DO MAR

O ONDE — Os deslizamentos translacionais rasos são notadamente associados à faixa de terreno superior de encostas retilíneas com inclinações superiores a 35º e 40º encimadas por rupturas de declive positivas. O que coincide, via de regra, com a faixa de passagem da crista para as encostas dos espigões. Rupturas de declive referem-se a alterações sensíveis na inclinação topográfica dos terrenos. Podem ser positivas quando se passa de uma inclinação menor para uma inclinação maior, ou negativas, quando em uma seqüência inversa. Notar adiante nas fotos que registram grandes eventos de escorregamentos na Serra do Mar a invariável proximidade das raízes desses escorregamentos da crista dos espigões.

O QUANDO — A ocorrência generalizada desses deslizamentos está comprovadamente relacionada a históricos pluviométricos caracterizados por prolongadas chuvas de saturação culminadas com episódios de alta pluviosidade concentrada, condição climática típica dos meses de verão nas regiões tropicais. Ainda que a relação chuvas/deslizamentos seja específica de cada sub-região da Serra do Mar, pode-se ter como indicação geral que as probabilidades de ocorrência desse tipo de movimento de massa são reais e crescentes a partir de históricos pluviométricos caracterizados por episódios pontuais de chuvas maiores de 100 mm/dia antecedidos por 3 ou 4 dias de chuvas de saturação.

O COMO — A dinâmica desses deslizamentos é associada às trincas de tração e ao solo distendido altamente permeável normalmente ocorrentes em uma faixa de terreno de largura média em torno de 2 a 3 metros, paralela e próxima à linha de cumieira (crista) dos espigões, logo abaixo da ruptura positiva de declive aí presente. Essa faixa de terreno corresponde a uma zona de tração máxima promovida pelas diferenças de intensidade do rastejo dos solos superficiais a montante e a jusante da ruptura de declive (intensidade de rastejo praticamente nula no trecho convexo da crista do espigão e intensidade máxima de rastejo ao longo do trecho retilíneo da vertente que se desenvolve logo a seguir). Essas trincas e essa faixa de solo distendido de alta permeabilidade relativa, fatores ampliados quando de chuvas de saturação prolongadas, permitem, quando de episódios

de alta pluviosidade concentrada, uma direta, volumosa e rápida penetração de água nos horizontes dos solos superficiais e solos saprolíticos, com saturação completa e formação de bolsões instantâneos de água que, a depender da relação de esforços resistentes e atuantes, podem provocar um verdadeiro desmonte hidráulico na "raiz" do deslizamento. Por força das trincas de tração e do solo distendido de alta permeabilidade, os fenômenos hidráulicos/geotécnicos na "raiz" do deslizamento planar são totalmente diferenciados daqueles que ocorrem ao longo da extensão longitudinal jusante de todo o deslizamento, ou seja, enquanto na "raiz" há um desmonte hidráulico instantâneo, o material a jusante da raiz é mobilizado por arraste ou sobrecarregamento, mecanismos obviamente facilitados pelo estado geral de grande saturação dos solos superficiais nos episódios de chuva descritos, não se estabelecendo em nenhum momento uma superfície clássica e contínua de ruptura. A análise de uma cicatriz de um deslizamento translacional raso evidencia claramente essa observação, com a "raiz" via de regra apresentando uma profundidade maior que o corpo restante do escorregamento, inclusive com **comum** mobilização local de ao menos parte do horizonte de solo saprolítico.

As corridas de detritos e os deslizamentos translacionais rasos – Em sua expressiva maior parte as corridas de detritos, eventos de maior poder destrutivo na Serra do Mar, ocorrem pela conjunção dos materiais (solo, rocha, água, restos vegetais) trazidos para o eixo de talvegue por inúmeros deslizamentos planares que ocorrem simultaneamente nas vertentes de vales serranos. Em sua movimentação a corrida de detritos mobiliza adicionalmente materiais residuais ou colu-vionares pré-existentes ao longo de seu percurso.

O nível d'água e os deslizamentos - O NA do lençol freático é normalmente profundo na escarpa da Serra do Mar, especialmente nas zonas das encostas onde se dão os deslizamentos translacionais rasos, não se associando nunca, portanto, à dinâmica desses fenômenos. De uma forma geral, no contexto da Serra, os horizontes inferiores drenam os horizontes superiores.

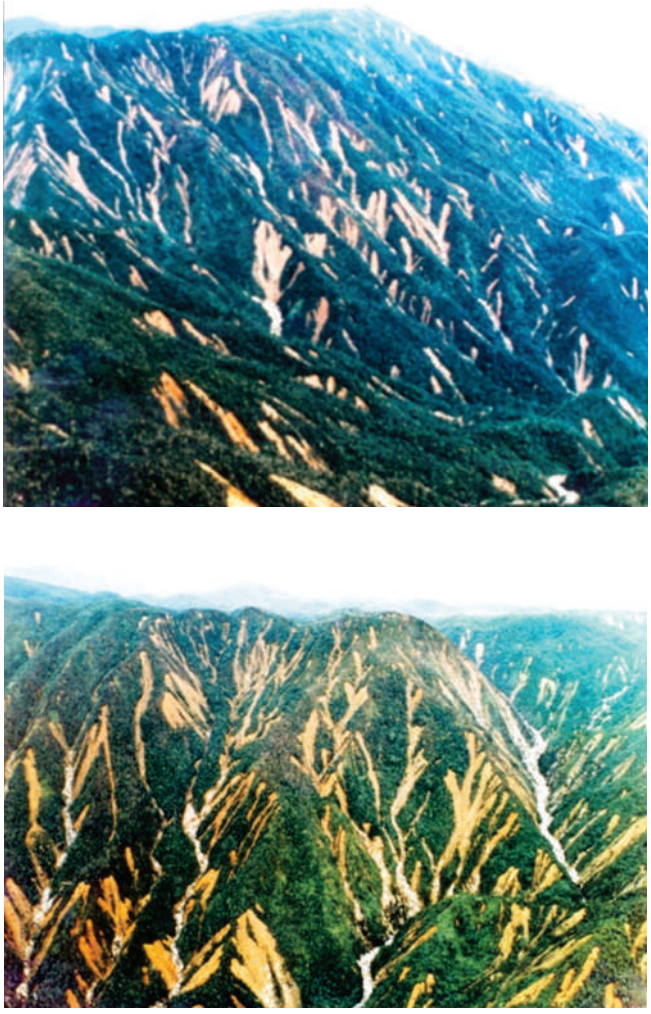


Foto 5: Fotos mostrando o episódio de inúmeros deslizamentos translacionais rasos (planares) ocorridos em 1985 nas encostas do vale do Rio Mogi. Esses deslizamentos estão relacionados ao início de fenecimento da vegetação arbórea provocado pela poluição do Pólo Industrial de Cubatão. O fato comprova o efetivo papel da vegetação na estabilidade das encostas, acrescendo-se que os deslizamentos foram potencializados estava ainda totalmente preservada. Notar a invariável proximidade das raízes dos escorregamentos das cristas dos espigões, mostrando sua nítida relação com a faixa de tração máxima de solos (trincas e alta permeabilidade) situada logo abaixo da ruptura positiva de declive. (Foto Arquivo IPT)

A floresta e os deslizamentos - A vegetação natural da Serra do Mar (Floresta Atlântica de Encostas — Floresta Ombrófila Densa) constitui o único e espetacular fator externo inibidor dos deslizamentos e de todas as formas de movimentação superficial dos terrenos, cumprindo esse papel por meio dos seguintes atributos:

- impede a ação direta das gotas de chuva no solo através das copas e da serapilheira;
- impede a ação erosiva das águas de chuva por meio de raízes superficiais e da serapilheira. Mesmo em chuvas de grande intensidade, as águas das drenagens que correm da Serra para a Baixada permanecem cristalinas, sem nenhum turvamento que possa suscitar a remoção de solos por erosão, o que demonstra o alto grau de proteção aos solos promovido pelo corpo florestal.
- retém por molhamento de todo o corpo arbóreo parte da água da chuva que chegaria ao solo;
- dilui no tempo o acesso das chuvas ao solo;
- retira por absorção, e devolve à atmosfera por evapo-transpiração, parte da água infiltrada no solo;
- agrega, "coesiona" e retém os solos superficiais através de uma formidável malha superficial e subsuperficial de raízes.
- diferentemente das florestas frias e temperadas, em que as árvores se encontram relativamente separadas umas das outras, nas florestas tropicais as copas das árvores são contíguas, formando um único corpo vegetal. Dessa característica decorre que, sob ventos intensos, não se estabelece o efeito alavanca, pelo qual o tombamento de uma árvore possa participar do início de um deslizamento.

Figura 6: Imagem mostrando o aspecto extremamente denso da diversificada vegetação (notar as mais diferentes cores das copas arbóreas), com as copas formando um único e solidário corpo vegetal. A vegetação constitui o único, mas fantástico, fator externo de proteção das encostas contra escorregamentos.

A ENGENHARIA GEOTÉCNICA E OS DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS

Especialmente a partir de 1975, com os estudos de Morgenstern e Mattos, e mais adiante, de Wolle, Pedrosa, Abramento e Carvalho, os engenheiros geotécnicos dedicaram especial atenção ao equacionamento físico-matemático dos deslizamentos translacionais rasos naturais, associando-os, de uma forma geral, à perda de resistência, por eliminação da coesão aparente dos solos superficiais, como conseqüência da ação de frentes de saturação de fluxo vertical. Carvalho (1989), em sua dissertação de mestrado, salienta a importância da condutividade hidráulica dos solos superficiais como fator essencial na dinâmica dos deslizamentos translacionais: "*Dada a heterogeneidade característica dos solos coluvionares superficiais da Serra do Mar, os esforços nesse sentido (aperfeiçoamentos na metodologia utilizada para a determinação da condutividade hidráulica saturada na velocidade de infiltração) devem direcionar-se para a definição de ensaios, de campo e laboratório, que permitam reproduzir mais fielmente as condições prevalecentes na natureza, e para a utilização, na análise da estabilidade de taludes, de modelos que incorporem a variação espacial da condutividade hidráulica na área em estudo.*" *(Carvalho, 1989).*

Vale lembrar o registro do engenheiro Costa Nunes, em 1969, sobre o evento catastrófico da Serra das Araras ocorrido no ano de 1966 (jan./fev.): "*a chuva torrencial demoliu hidraulicamente a cobertura de solo das encostas... mantos de alteração deslizaram pela encosta abaixo num estado de liquefação completa do solo.*"

REFERÊNCIA

Carvalho, C. S. *Estudo da Infiltração em Encostas de Solos Insaturados na Serra do Mar*. 1989. 154 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SANTOS, A. R. A grande barreira da Serra do Mar: da trilha dos Tupiniquins à rodovia dos Imigrantes. 1ª ed São Paulo: O Nome da Rosa, 2004. (3ª ed São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2024).

18CBGE

Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

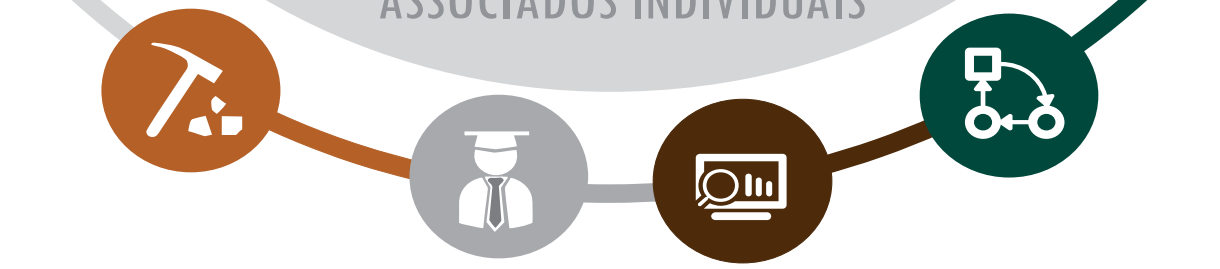
Eventos Extremos
e sua repercussão na Geologia de Engenharia e Ambiental

17 a 21 Agosto · 2025

Minascentro
Belo Horizonte - MG

SÓCIOS PATROCINADORES DA ABGE

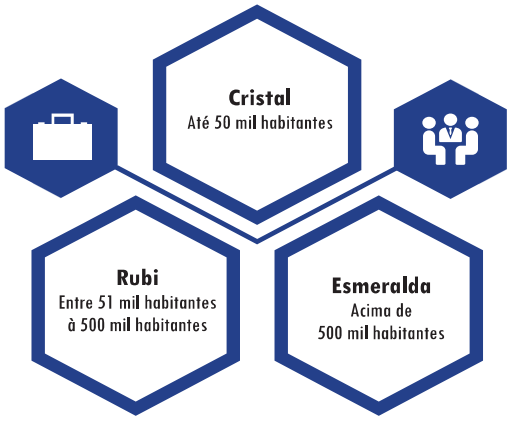
SEJA SÓCIO DA ABGE
ASSOCIADOS INDIVIDUAIS



TÍTULAR | ESTUDANTE | AFILIADO | SÊNIOR E MASTER

SÓCIOS
PATROCINADORES
EMPRESAS E ENTIDADES

SÓCIOS
PATROCINADORES COLETIVOS
PREFEITURAS



Vantagens do Sócio ABGE

- Recebe grátis todas as publicações editadas pela entidade durante o período de filiação;
- Recebe informações técnicas e acadêmicas/participa de network;
- Desconto em cursos e eventos promovidos pela ABGE e entidades parceiras.

A melhor relação entre custo e benefício de entidades tecnocientíficas.
Previsão de distribuição de seis publicações no ano.
Consulte os valores de nossa anuidade.

www.abge.org.br/associe-se

ABGE | ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL