

# CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA E HIDROGEOLÓGICA DO ARENÍTICO EÓLICO DA FORMAÇÃO SAMBAÍBA – BACIA DO PARNAÍBA

GEOMECHANICAL AND HYDROGEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE  
SAMBAÍDA FORMATION'S EOLIC SANDSTONE - PARNAÍBA BASIN

ERIK WUNDER

*Geólogo, Estelar Engenheiros Associados Ltda.*

## RESUMO ABSTRACT

Apresentam-se os resultados da caracterização geomecânica e hidrogeológica do maciço arenítico brando pertencente à unidade litoestratigráfica Arenito Sambaíba, que hospedou as escavações e recebeu as estruturas civis da Usina Hidrelétrica Estreito (1.087 MW), localizada no rio Tocantins, divisa dos estados do Maranhão e Tocantins. Este texto corresponde a um compêndio de dois artigos previamente publicados, um no 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics (Pequim, 2011) e outro apresentado na ISRM Specialized Conference on Soft Rocks (Pequim, 2014).

A apresentação deste texto foi motivada pela intenção e pela pertinência de tornar esse conjunto de informações mais fácil e diretamente disponível aos profissionais do meio geotécnico brasileiro.

**Palavras-chave:** arenito, rocha branda, caracterização geomecânica

It is presented in this article the results of the geomechanical and hydrogeological characterization of the soft sandstone belonging to the lithostratigraphic unit Arenito Sambaíba, which has hosted the excavations and the civil structures of the Estreito Hydro Power Plant (1,087 MW), located in the Tocantins River, the border of Maranhão State and Tocantins State. This paper corresponds to a compendium of two previously published articles, one at the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics (Beijing, 2011) and another presented at the ISRM Specialized Conference on Soft Rocks (Beijing, 2014).

The presentation of this text was motivated by the intention and the pertinence of making this set of information easier and directly available to the professionals of the Brazilian geotechnical environment.

**Keywords:** sandstone, soft rock, geomechanical characterization

## 1 INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica Estreito está localizada no rio Tocantins, divisa dos estados do Maranhão e do Tocantins. O sítio que hospeda a usina insere-se no ambiente geológico da Província Sedimentar do Meio Norte, ou Província Parnaíba (Figura 1) que consiste em quatro sítios deposicionais, quais sejam Bacia do Parnaíba, Bacia das Alpercatas, Bacia do Grajaú e Bacia do Espigão-Mestre.

Verifica-se no local uma sequência estratigráfica correspondente ao limite superior da sequência sedimentar da Bacia do Parnaíba com a base da sequência da Bacia Alpercatas, composta respectivamente pelos arenitos triássicos da Formação Sambaíba e pelos basaltos jurássicos da Formação Mosquito.

Os estratos da Formação Sambaíba posicionam-se como maciço de fundação das principais estruturas civis da usina. Esta unidade consiste de uma sequência arenítica caolinítica de granulometria fina bimodal de origem eólica, com estratificações acanaladas de grande porte, representante do final da fase de desertificação da bacia. Possui caracteristicamente grãos sub-angulares a sub-arredondados e superfície fosca, de coloração predominantemente avermelhada a alaranjada e amarelada (Figura 2).



Figura 1. Bacias sedimentares da Província Parnaíba



Figura 2. Talude de escavação para a implantação do circuito de adução e geração da usina mostrando o contato entre o Arenito Sambaíba (base) e o Basalto Mosquito (topo)

Em campo, a rocha apresenta-se com coerência branda (C4), com passagens muito a extremamente brandas (C5), exceto nas proximidades do contato com o Basalto Mosquito, onde o arenito mostra um processo de silicificação, apresentando-se relativamente mais coerentes (C3) que o restante da sequência.

Foram realizadas algumas campanhas de ensaios para a caracterização do Arenito Sambaíba quanto às suas propriedades de resistência, deformabilidade e condutividade hidráulica, além da caracterização geotécnica da rocha.

Os ensaios laboratoriais foram executados em amostras selecionadas dos testemunhos das sondagens executadas desde a fase de Estudo de Viabilidade até a fase do desenvolvimento do Projeto Executivo e implantação do empreendimento. As campanhas de ensaios laboratoriais estão descritas na tabela abaixo.

Tabela 1. Ensaios laboratoriais executados

Ensaio	Nº de Amostras
Caracterização Geotécnica	65
Permeabilidade	17
Resistência e Deformabilidade	23
Compressão Diametral	6
Carregamento Pontual	40
Cisalhamento Direto	11

Além dos ensaios de permeabilidade em laboratório, foram executados 387 ensaios de

perda d'água sob pressão nos furos de sondagens os quais forneceram um conjunto de informações essencial para a caracterização hidrogeológica do maciço arenítico.

## 2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Foram realizados 65 ensaios, cada um obtendo os parâmetros massa específica aparente seca ( $\delta_{seca}$ ), massa específica aparente saturada ( $\delta_{sat}$ ), absorção de água ( $S_{\%}$ ) e porosidade ( $P_{\%}$ ).

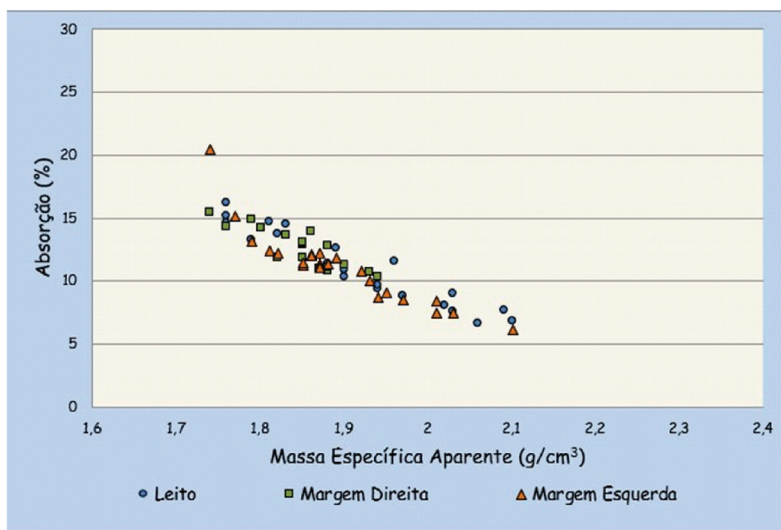
As amostras ensaiadas foram também identificadas conforme o local de coleta, sendo possível então discretizá-las conforme o local de origem, sendo leito do rio (23 amostras), na margem direita (18 amostras) ou na margem esquerda (24

amostras). Os valores médios estão apresentados na tabela abaixo:

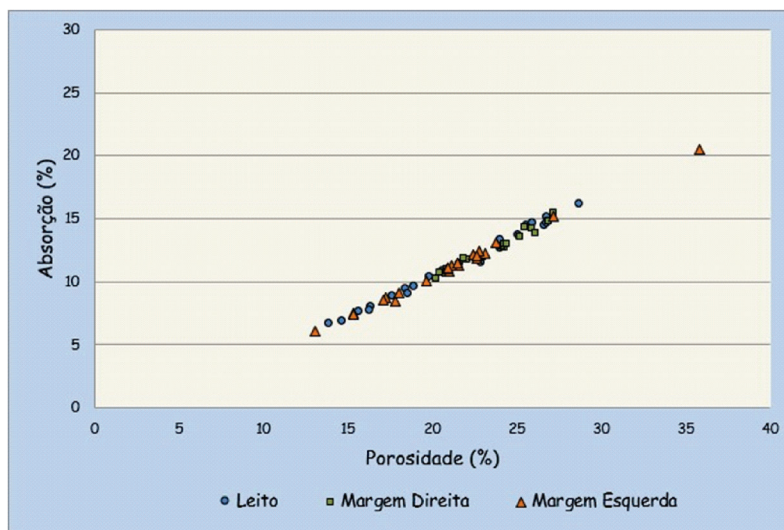
**Tabela 2.** Resultados dos ensaios de caracterização física do Arenito Sambaíba

	$\delta_{seca}$ g/cm <sup>3</sup>	$\delta_{sat}$ g/cm <sup>3</sup>	S %	P %
Leito	1,91±0,11	2,12±0,07	11,28±2,94	21,23±4,43
M Direita	1,85±0,05	2,08±0,04	12,68±1,58	23,38±2,38
M Esquerda	1,89±0,09	2,10±0,05	11,17±2,88	20,95±4,48
<b>GERAL</b>	<b>1,89±0,09</b>	<b>2,10±0,05</b>	<b>11,63±2,66</b>	<b>21,72±4,07</b>

Os gráficos abaixo mostram as correlações massa específica x absorção (Figura 3) e porosidade x absorção (Figura 4).



**Figura 3.** Relação Massa Específica Aparente Seca x Absorção d'Água



**Figura 4.** Relação Porosidade x Absorção d'Água

Os resultados apresentados nos gráficos acima confirmam numericamente o comportamento inversamente proporcional da absorção d'água ( $S_{\%}$ ) em relação à massa específica aparente seca ( $r_{seca}$ ), e a relação direta entre a absorção d'água ( $S_{\%}$ ) com a porosidade ( $P_{\%}$ ) das amostras de arenito, independentemente do local de amostragem.

Por uma aproximação linear destas relações tem-se:

$$S_{(\%)} = 62,46 - 26,95.dseca_{(g/cm^3)}$$

$$S_{(\%)} = 0,65.P_{(\%)} - 2,51$$

Os resultados da caracterização física foram também inseridos nos gráficos produzido por Kanji & Galván (1998) que correlacionam porosidade x massa específica seca e absorção e porosidade.

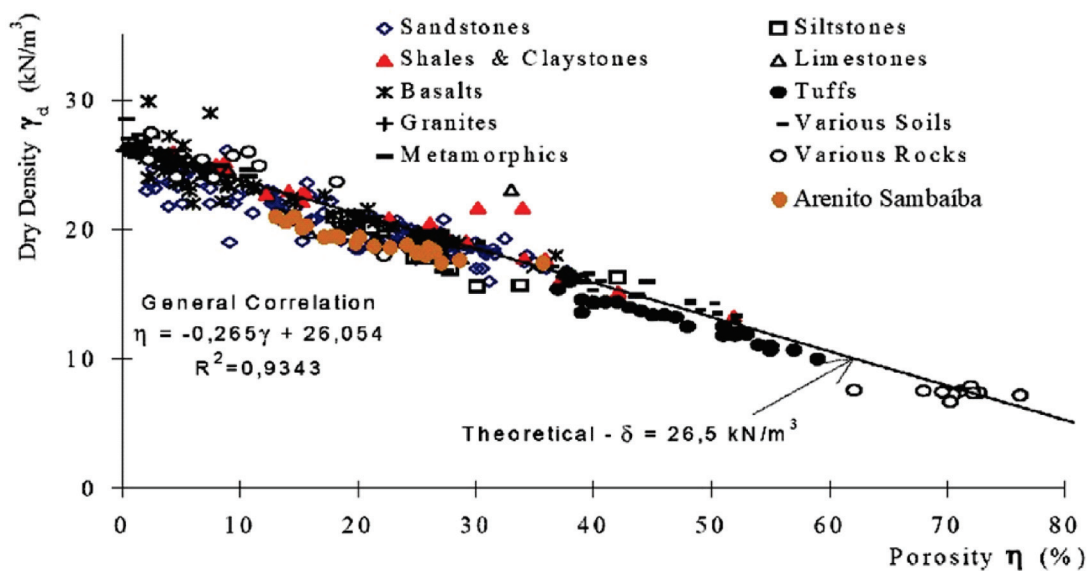


Figura 5. Gráfico de correlação entre porosidade e massa específica seca (Kanji & Galván 1998)

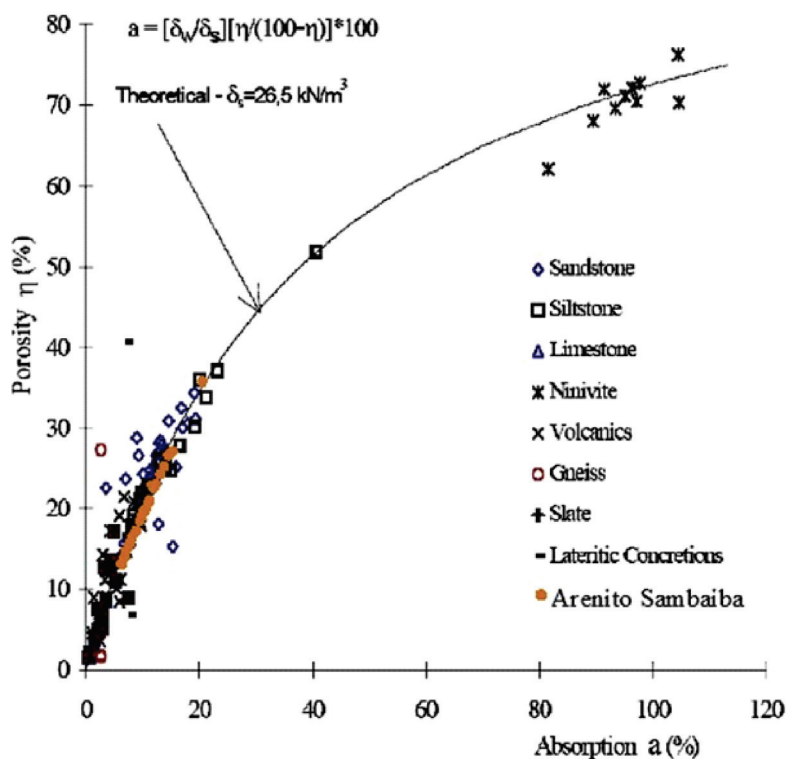


Figura 6. Gráfico de correlação entre absorção e porosidade (Kanji & Galván 1998)



Os resultados mostraram também boa adequação aos valores considerados por Kanji & Galván (1998), posicionando-se próximos aos pontos correspondentes aos outros arenitos considerados por aqueles autores.

### 3 CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

#### Compressão Simples e Módulo de Deformabilidade

A caracterização geomecânica foi feita através da obtenção dos parâmetros de resistência a compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ), resistência a tração por compressão diametral ( $\sigma_t$ ) e de deformabilidade (E).

Foram testadas 23 amostras coletadas na margem direita, margem esquerda e no leito do rio, para a determinação de  $\sigma_c$  e E, e 6 amostras representantes do leito do rio e margem esquerda para obtenção da resistência à tração ( $\sigma_t$ ). Os valores médios estão apresentados ao lado.

Os valores encontrados para a resistência à compressão uniaxial qualificam o Arenito Sambaíba

como uma rocha branda, de acordo com as classificações propostas por ISRM (1981) e Vaz (1996).

**Tabela 3.** Resultados dos ensaios de compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) e deformabilidade (E)

	$\delta_{\text{aparente}}$ g/cm <sup>3</sup>	$\sigma_c$ MPa	E GPa
Leito	1,86±0,15	14,24±7,19	19,69±9,75
M Direita	1,81±0,04	14,41±4,15	13,49±1,75
M Esquerda	1,92±0,09	25,06±6,83	17,83±3,66
<b>GERAL</b>	<b>1,86±0,11</b>	<b>18,07±7,85</b>	<b>16,89±6,18</b>

**Tabela 4.** Resultados dos ensaios de compressão diametral ( $\sigma_t$ )

	$\delta_{\text{aparente}}$ g/cm <sup>3</sup>	$\sigma_t$ MPa
Leito	1,75±0,05	1,17±0,31
M Direita	1,70±0,04	0,78±0,10
M Esquerda	---	---
<b>GERAL</b>	<b>1,73±0,05</b>	<b>1,04±0,32</b>

Class	Approx. Range of Strength $\sigma_c$ (MPa)	Strength	Field Definition
R0	< 1	Extremely weak rock	Crumbles in hand
R1	1 to 5	Very weak rock	Thin slabs break easily under hand pressure
R2	5 to 25	Weak rock	Thin slabs break easily under heavy hand pressure
R3	25 to 50	Medium strong rock	Lumps on core broken by light hammer blows
R4	50 to 100	Strong rock	Lumps on core broken by heavy hammer blows
R5	100 to 250	Very strong rock	Lumps only chip with heavy hammer blows. Dull ringing sound
R6	> 250	Extremely strong rock	Rocks ring on hammer blows. Sparks fly

**Figura 7.** Quadro de classificação de rochas segundo a resistência à compressão uniaxial (ISRM, 1981)

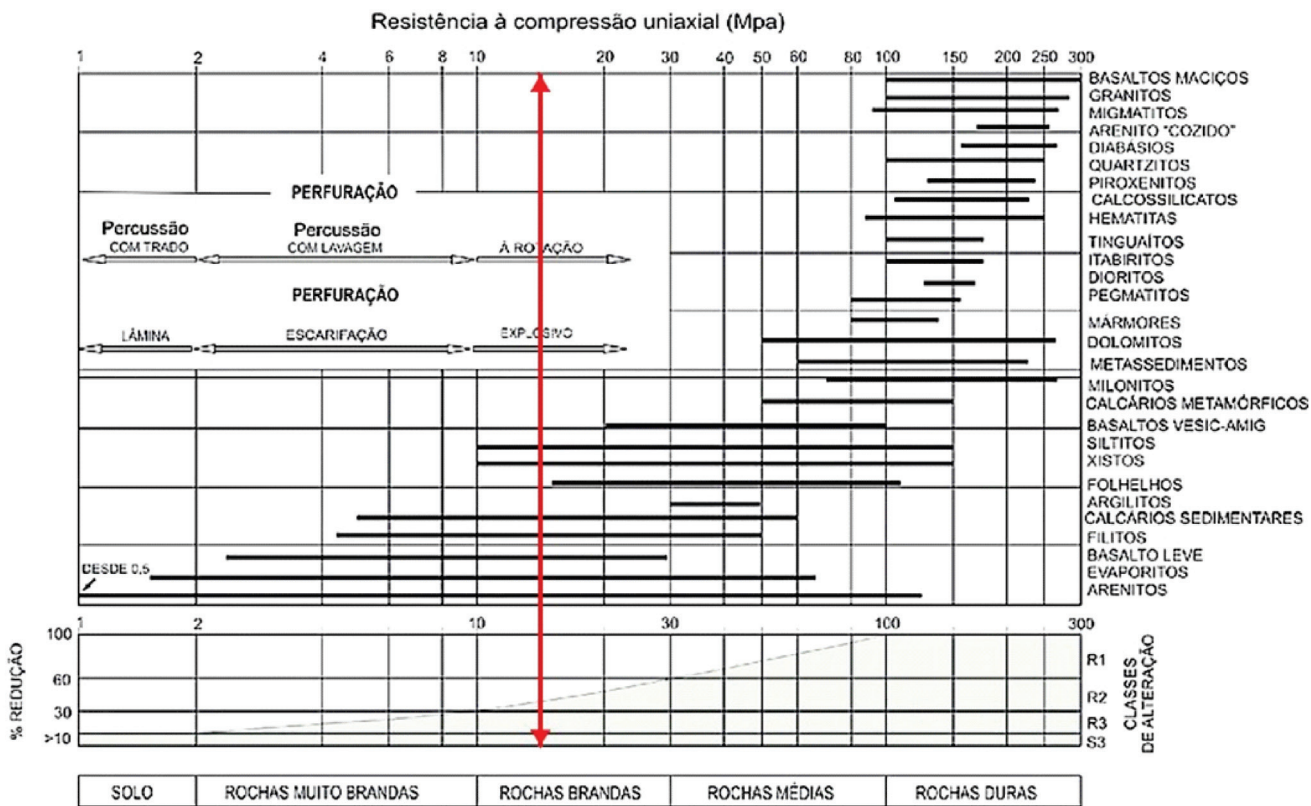


Figura 8. Ábaco de classificação dos materiais geotécnicos segundo a resistência à compressão simples (Vaz, 1996)

Os resultados foram lançados em gráficos e as figuras abaixo apresentam as correlações encontradas para massa específica x resistência

uniaxial (Figura 9), massa específica x deformabilidade (Figura 10) e resistência uniaxial x deformabilidade (Figura 11)

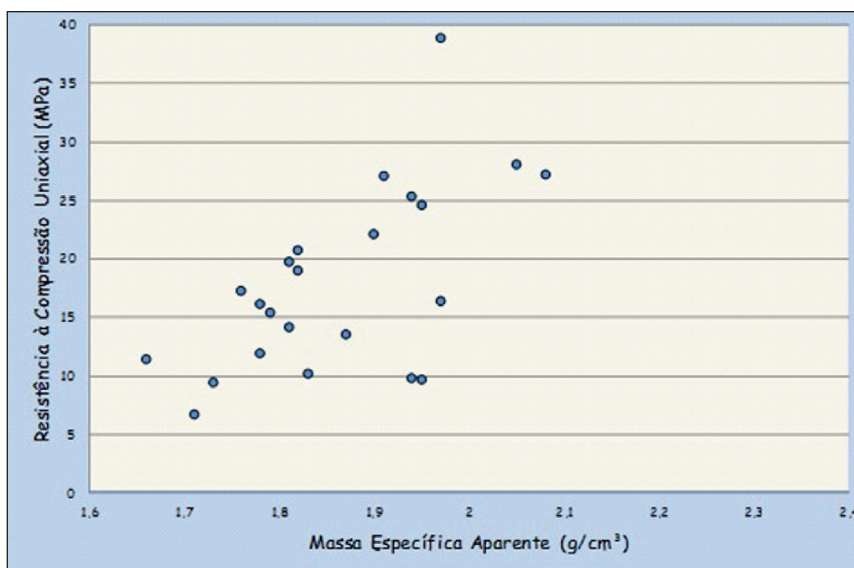


Figura 9. Resistência à compressão uniaxial x massa específica aparente

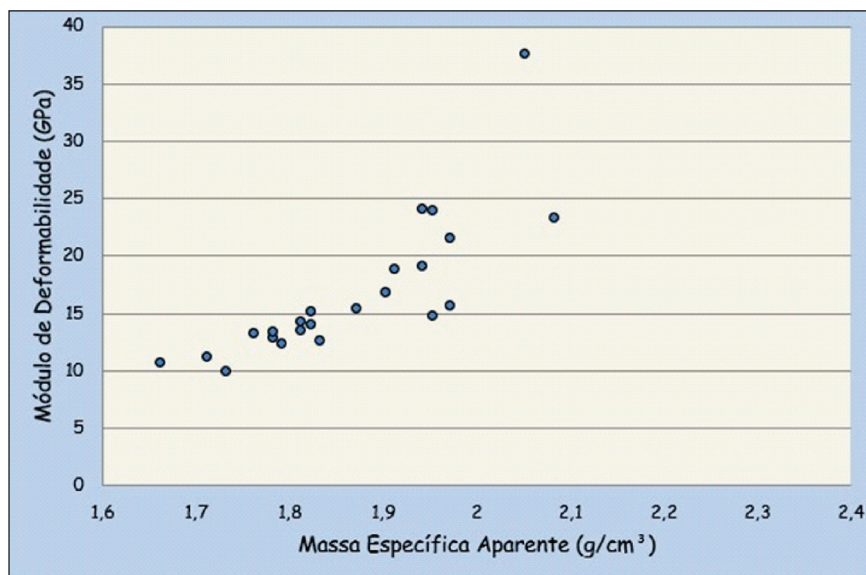


Figura 10. Módulo de deformabilidade x massa específica aparente

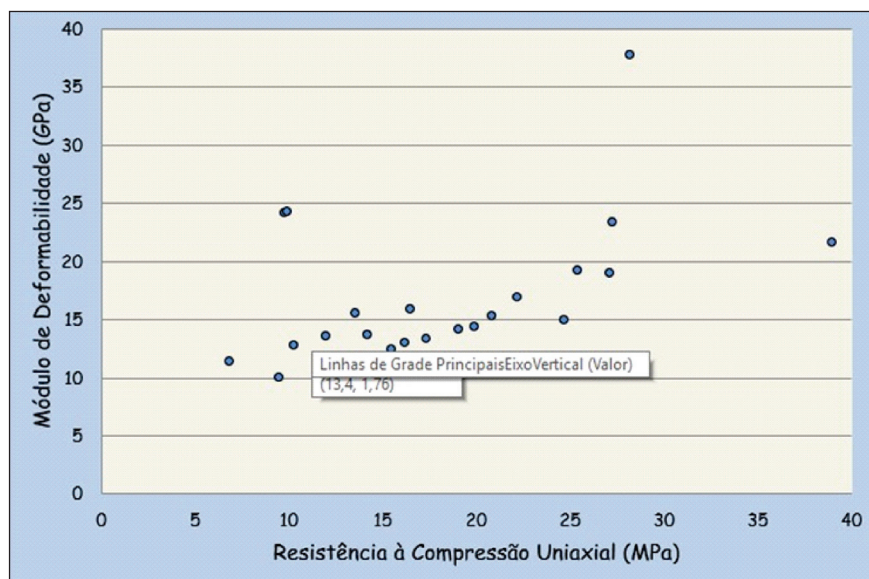


Figura 11. Resistência à compressão uniaxial x módulo de deformabilidade

É interessante notar que os valores de deformabilidade lançados em função da massa específica mostram-se melhor organizados e mais alinhados em comparação à respectiva disposição dos valores de resistência uniaxial.

Ao mesmo tempo, quando comparados entre si, os valores de resistência e de deformabilidade do Arenito Sambaíba mostram uma visível organização, com a esperada relação diretamente proporcional. Desconsiderando os valores

desalinhados, mais afastados, a aproximação linear é dada por:

$$E_{(MPa)} \cong 450 \cdot \sigma_{C(MPa)}$$

Estes resultados foram também lançados no gráfico de resistência à compressão uniaxial x módulo de deformabilidade produzido por Kanji & Galván (1998) e estão mostrados na Figura 12.



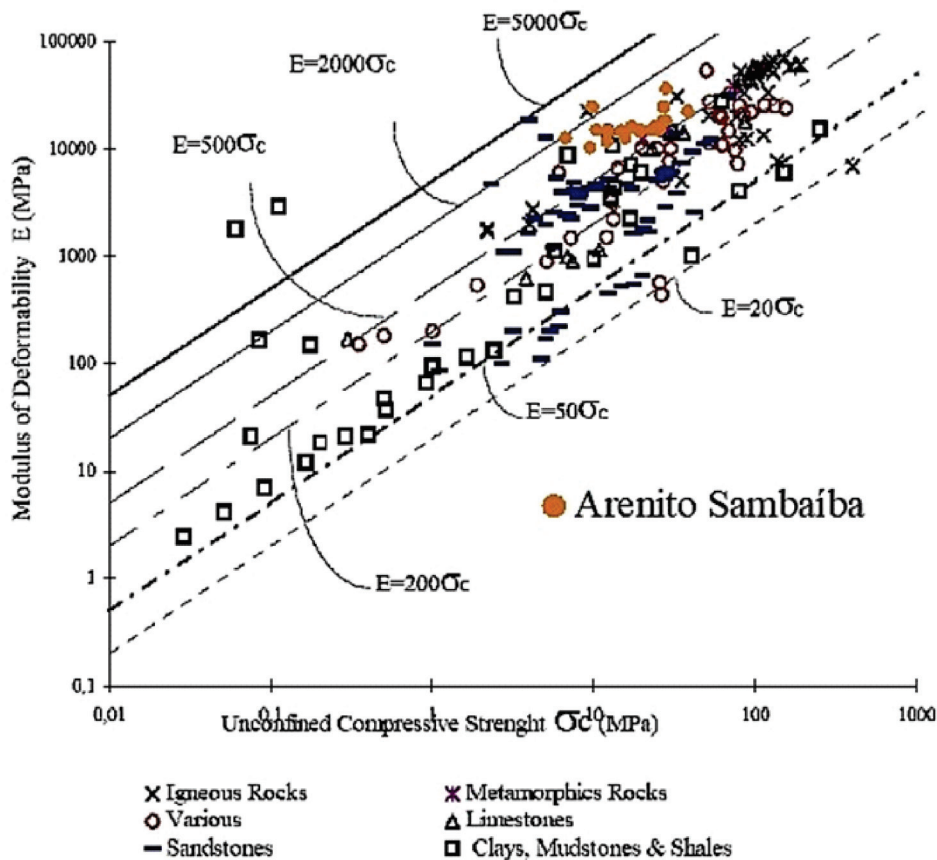


Figura 12. Resistência uniaxial x deformabilidade de Kanji & Galván (1998) com os valores do Arenito Sambaíba

Observa-se que os resultados do Arenito Sambaíba se aproximam dos demais pontos correspondentes a arenitos mas posicionam-se logo acima deles pois mostraram valores de módulo de deformabilidade relativamente superiores para os mesmos patamares de resistência uniaxial.

### Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em 11 amostras, sendo que em 6 delas o carregamento normal foi paralelo ao acamamento e em 5 o carregamento normal foi perpendicular à estratificação. Na tabela abaixo estão apresentados os resultados dos ensaios:

Tabela 5. Resultados dos ensaios de cisalhamento

	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\varphi$ (°)
Paralelo	0,993	0,980	44,6
	1,012	2,187	65,2
	1,975	3,072	57,3
	2,016	3,201	57,8
	3,003	4,135	54,0
	4,003	5,306	53,0
Perpendicular	1,034	2,725	69,2
	2,009	3,145	57,4
	2,505	3,776	56,4
	3,006	4,027	53,3
	4,006	5,815	55,4

O gráfico a seguir mostra a distribuição destes pontos no espaço  $\sigma_n \times \tau$ .



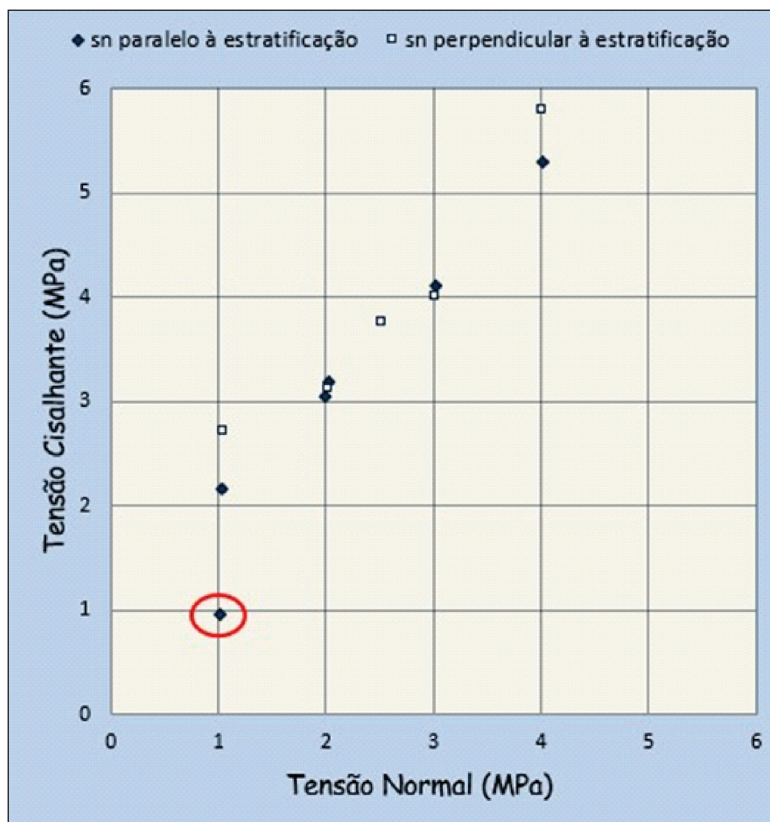


Figura 13. Envoltória de resistência do Arenito Sambaíba obtida por ensaios de cisalhamento direto.

O resultado salientado no gráfico foi atribuído à presença de uma descontinuidade que condicionou a baixa resistência ao cisalhamento do corpo de prova. Assim, desconsiderando-se este resultado, verifica-se que os demais pontos se

organizam próximo à linearidade no intervalo de cargas normais aplicadas. Deste modo, as aproximações lineares para as condições de carregamento consideradas foram:

Paralelo..... $\tau=1,040\sigma_n+1,081$ ..... $c = 1,081 \text{ MPa} ; \varphi = 46,1^\circ$

Perpendicular..... $\tau=1,025\sigma_n+1,320$ ..... $c = 1,320 \text{ MPa} ; \varphi = 45,7^\circ$

A distribuição dos pontos na Figura 13 mostra que a anisotropia estrutural dada pelos planos de estratificação oferece um condicionante marginal, porém presente sobre a resistência ao cisalhamento pela matriz arenosa do Arenito Sambaíba, o que é comum nas rochas brandas. O índice de anisotropia é de 1,22 para o parâmetro da coesão (c) e 1,008 para o ângulo de atrito interno ( $\phi$ )

dade hidráulica, tanto da matriz arenosa (permeabilidade primária) como do maciço arenítico (permeabilidade secundária). A primeira foi avaliada através de ensaios laboratoriais em permeômetro com carga variável e permeômetro na câmara triaxial, enquanto que a segunda foi verificada através de ensaios de perda d'água realizados nos furos de sondagens.

#### 4 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Foram executadas campanhas de ensaios e testes para avaliar as propriedades de condutivi-

Foram executados 17 ensaios laboratoriais, sendo 8 com carga variável e 9 na câmara triaxial. A tabela abaixo apresenta os valores médios obtidos.

**Tabela 6.** Resultados dos ensaios de permeabilidade em laboratório

	Número de ensaios	Carga Variável	Câmara Triaxial
		$k_{20}$ (cm/s)	$k_{20}$ (cm/s)
Leito	4	$7,24 \times 10^{-5}$	---
M Direita	2	$2,24 \times 10^{-5}$	---
M Esquerda	11	$6,00 \times 10^{-5}$	$6,41 \times 10^{-5}$
<b>GERAL</b>	<b>17</b>	<b><math>5,78 \times 10^{-5}</math></b>	

Esta campanha de ensaios indicou que a matriz arenosa tem condutividade hidráulica ( $k_{20}$ ) de  $5,78 \times 10^{-5}$  cm/s.

As campanhas de ensaios de perda d’água sob pressão acumularam 387 testes, distribuídos pela margem direita (151), margem esquerda (123) e leito do rio (113).

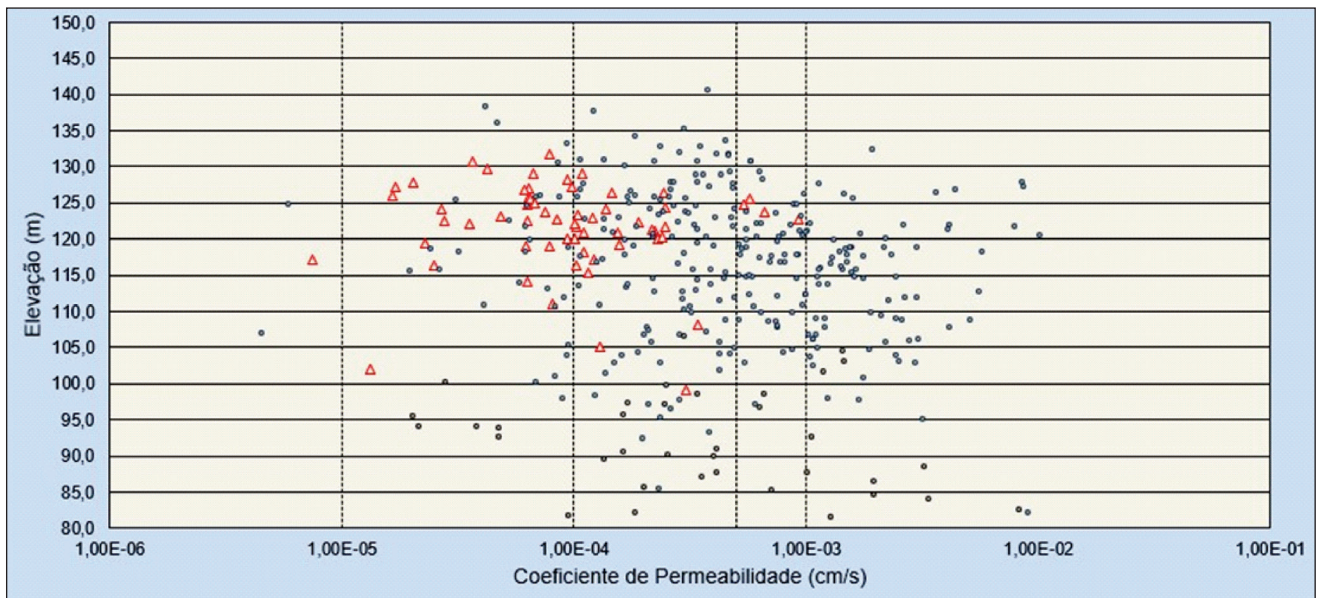
Fica clara a existência do efeito de escala sobre o coeficiente de permeabilidade, visto que, a permeabilidade secundária do maciço arenítico ( $3,44 \times 10^{-4}$  cm/s) é, em média, uma ordem de

magnitude maior que a permeabilidade primária da matriz arenítica ( $5,78 \times 10^{-5}$  cm/s).

**Tabela 7.** Resultados dos ensaios de perda d’água sob pressão em furos de sondagem

	Número de ensaios	$k_{médio}$ (cm/s)
Leito	113	$3,61 \times 10^{-4}$
M Direita	151	$2,06 \times 10^{-4}$
M Esquerda	123	$6,22 \times 10^{-4}$
<b>GERAL</b>	<b>387</b>	<b><math>3,44 \times 10^{-4}</math></b>

Os resultados dos ensaios de campo também foram analisados quanto à condição de confinamento, ou seja, quanto à existência de maciço basáltico sobreposto ao maciço arenítico, na região onde foi executado o ensaio. O gráfico abaixo mostra a distribuição dos resultados destes ensaios em função das respectivas elevações, identificando-os quanto a respectiva condição de confinamento.



**Figura 14.** Resultados dos ensaios de perda d’água sob pressão com triângulos vermelhos indicando os pontos “confinados”, subjacente ao maciço basáltico.

A tabela a seguir apresenta os valores médios obtidos nos ensaios de perda d’água sob pressão,

identificando-os conforme o local de execução e condição de confinamento.



**Tabela 8.** Valores médios obtidos por ensaios de perda d'água

	n° de ensaios		k (cm/s)	
	confinado	não confinado	confinado	não confinado
Leito	---	113	---	$3,61 \times 10^{-4}$
M Direita	59	92	$9,37 \times 10^{-5}$	$3,44 \times 10^{-4}$
M Esquerda	2	46	$2,88 \times 10^{-5}$	$2,45 \times 10^{-4}$

(1)-"confinado": existência de camada basáltica sobre o maciço arenítico; "não confinado": maciço arenítico aflorante, sem a cobertura do maciço basáltico

Nota-se então que a condição de confinamento do maciço arenítico tem marcante influência sobre a respectiva característica de permeabilidade, de modo que a condição "não confinada" apresenta comparativamente uma maior condutividade em aproximadamente 1 (uma) ordem de magnitude.

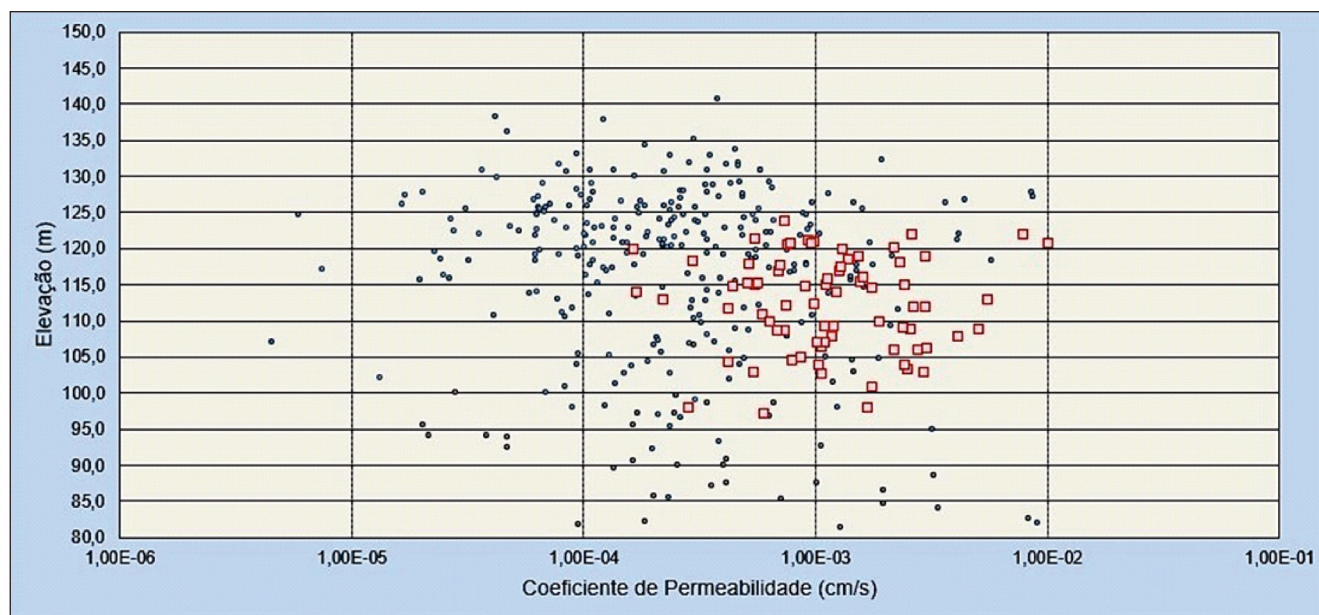
Outra característica interessante mostrada pelos resultados dos ensaios de perda d'água

corresponde à influência do alívio de carga litostática, gerado pela escavação. A tabela abaixo apresenta os valores médios de condutividade hidráulica obtidos por testes executados antes do início da escavação e os resultados dos testes feitos após a execução da escavação para a implantação das estruturas civis.

**Tabela 9.** Valores médios de condutividade hidráulica antes e depois das escavações

Local	Condição	N° ensaios	k(cm/s)
M Esquerda	confinado	2	$2,88 \times 10^{-5}$
M Esquerda	não confinado	46	$2,45 \times 10^{-4}$
M Esquerda	pós escavação	75	$1,15 \times 10^{-3}$

O gráfico abaixo mostra a distribuição dos valores de coeficiente de permeabilidade em função das respectivas elevações, salientando os pontos ensaiados após a execução da escavação.



**Figura 15.** Resultados dos ensaios de perda d'água sob pressão salientados os pontos correspondentes à condição "pós escavação".

É interessante notar que os resultados mostram um aumento de 1 (uma) ordem de magnitude da condição "pós escavação" em relação à condição "não confinada" e de 2 (duas) ordens de magnitude em relação à condição "confinada", o

que deixa evidente o forte condicionante do alívio das cargas litostáticas sobre as características de fluxo hidráulico pelo maciço arenítico do Arenito Sambaíba.



## 5 CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios laboratoriais forneceram informações que qualificam o maciço arenítico pertencente à Formação Sambaíba como uma rocha branda. A tabela abaixo apresenta os valores médios dos parâmetros geotécnicos e geomecânicos encontrados.

**Tabela 10.** Valores médios dos parâmetros geológicos e geomecânicos

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor médio
Massa específica seca	$\delta$	g/cm <sup>3</sup>	1,89
Absorção	S	%	11,63
Porosidade	P	%	21,72
Resistência uniaxial	$\sigma_c$	MPa	18,07
Resistência a tração	$\sigma_t$	MPa	1,04
Módulo de deformabilidade	E	GPa	16,89
Coesão (paralelo)	c	MPa	1,081
Ângulo de atrito interno (paralelo)	$\phi$	(°)	46,1
Coesão (perpendicular)	c	MPa	1,320
Ângulo de atrito interno (perpendicular)	$\phi$	(°)	45,7

A análise dos resultados de coeficiente de permeabilidade obtidos em laboratório e por ensaios de perda d'água em campo mostram um aumento de 1 (uma) ordem de magnitude da permeabilidade secundária em relação à permeabilidade primária. Interessante também foi a verificação de que o Arenito Sambaíba pode oferecer diferentes níveis de condutividade hidráulica dependendo da sua condição de confinamento ou de sobrecarga litostática, com o aumento de 1 (uma) ordem de magnitude da permeabilidade da condição "" para a condição não "confinado" (sem cobertura de basalto) e, desta, um novo acréscimo de 1 (uma) ordem de magnitude para a situação "confinado".

Por fim, a realização das campanhas de investigações in situ e em laboratório proporcionou a reunião de informações geológicas e geotécnicas de grande importância para o projeto e essenciais

para a elaboração da caracterização geomecânica e hidrogeológica do maciço arenítico de fundação das estruturas civis do empreendimento.

Apesar de ser onisciente no meio geológico e geotécnico nacional, essa constatação nunca está suficientemente salientada e merece ser sempre ressaltada, pois ainda nos dias de hoje, não é raro nos encontramos em situações onde temos que justificar, argumentar e convencer os tomadores de decisão quanto a importância de se realizar investigações geológicas em quantidade e em qualidade tais que proporcionem as condições e as informações suficientes para o conhecimento do ambiente geológico em nível adequado à respectiva fase do projeto.

## REFERÊNCIAS

- Bizzi, L. L., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Gonçalves, J. H. (eds), 2003 – Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. CPRM
- Hawkings, A. B., 1998 – Aspects of rock strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol 57.
- Kanji, M. A. & Galván, V. R., 1998 – Correlation of properties of soft rock. *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks. Anais do II International Symposium, Napoles.*
- Vaz, L. F., 1996 – Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. *Solo e Rocha – Revista Brasileira de Geotecnia*. São Paulo.
- Wunder, E., Meirelles, M. C., Borchardt, N., Calcina, A. M., Camargo, M. A. – Estreito HPP – Geotechnical and geomechanical characterization of the sandstone foundation rock mass. *Anais do 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Pequim, 2011.*
- Wunder, E. & Meirelles, M. C. – Soft sandstone physical and geomechanical characterization. *Anais do ISRM Specialized Conference on Soft Rocks, Pequim, 2014.*