

The use of MASW geophysical method for the characterization of geological materials in the construction of a hydroelectric plant in Brazil

El uso del método geofísico MASW para la caracterización de materiales geológicos en la construcción de una planta hidroeléctrica en Brasil

Nicole Borchardt¹ & Erik Wunder²

¹Engineering Geologist, ENGIE TRACTEBEL, Curitiba, PR, Brasil, nicole.borchardt@tractebel.engie.com

²Engineering Geologist, ERW Geomecânica, Florianópolis, SC, Brasil, erik.wunder@erwgeomecanica.com.br

Ana Lúcia Moreira Yoda³, Ricardo Abrahão⁴

³Geotechnical Engineer, Engie Tractebel, Belo Horizonte, MG, Brasil, ana.yoda@tractebel.engie.com

⁴Geologist, RA Geociências, São Paulo, SP, Brasil, ricardo@rageociencias.com.br

ABSTRACT: The project discussed in this article refers to the plant of a 30 MW small hydroelectric power plant (PCH Foz do Estrela), built in the southern region of Brazil. It is embedded in the geological domain of the volcanic flows of the Serra Geral Formation of the Paraná Sedimentary Basin, specifically in the acid strata composed mainly of rhyodacites. Due to the complexity of borehole information to define the geological model and the geotechnical parameters necessary for the safe development of the project, a MASW campaign was carried out especially in the area where the open pit excavations are located at the intake tunnel and power-house. Based on these results, a parametric study was carried out to estimate the geotechnical properties of the ground materials using the Geological Strength Index - GSI, and an evaluation of their strength properties and bearing capacity through the integrated analysis of geophysical (MASW) and geological (SPT) results. This article presents the results of the investigations and the analysis of their integration to enable the development of the design and construction of the PCH according to the stability and safety criteria considered for the implementation of hydroelectric plants in Brazil.

KEYWORDS: MASW, geotechnicals parameters, hydroelectric plant

1 INTRODUCCIÓN

En Brasil, debido al gran potencial hidráulico, se han desarrollado varios proyectos hidroeléctricos incluyendo circuitos de aducción subterránea que aprovechan condiciones geomorfológicas favorables, como valles encajados y topografía escarpada, lo que contribuye a minimizar los impactos ambientales. Sin embargo,

dependiendo de la complejidad geológica de la región, incluso campañas de prospección en cantidades representativas pueden no ser suficientes para la construcción asertiva del modelo geológico y la caracterización geotécnica de los materiales.

Este contexto se incluye la PCH Foz do Estrela, una pequeña central hidroeléctrica ubicada en el Municipio de Coronel Domingos Soares, en el Estado de Paraná, región Sur de Brasil

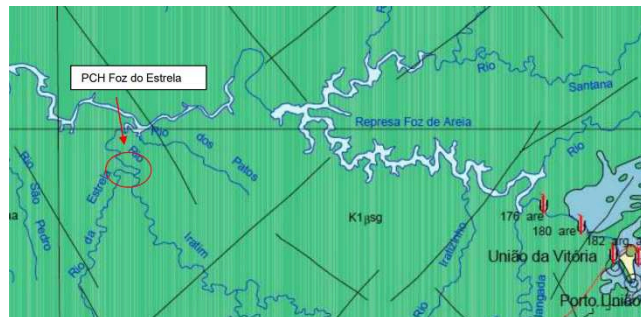


(Imagen 1). A pesar de las campañas de investigaciones directas (sondeos de la serie 100) e indirectas (refracción eléctrica y sísmica) propuestas en la etapa de Diseño Básico, combinadas con el programa de sondaje solicitado en la etapa de Diseño Básico Consolidado (serie 200), debido a cierta incertidumbre, se presentaron algunas ambigüedades con respecto al modelo geológico-geotécnico. Sólo durante la fase ejecutiva, con el avance de las excavaciones obligatorias y la respectiva exposición de los macizos de tierra y roca, se alcanzó observar directamente las variaciones de los materiales constituyentes y sus diferentes comportamientos, optándose por implementar una campaña de investigación adicional por el método sísmico basado en la dispersión de ondas superficiales denominado MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), lo cual fue decisivo para la consolidación del modelo geológico y para la definición de los parámetros geotécnicos, especialmente de los materiales que ocurren en la región de las vertientes de la Bocatomá y Casa de Máquinas, proporcionando además subvenciones para avanzar en el desarrollo de los proyectos de estabilidad en estas localidades.

Imagen 1. Ubicación de la PCH Foz do Estrela.

2 GEOLOGÍA LOCAL

En el contexto general, la región se inserta en el dominio



geológico de flujos volcánicos de la Formación Serra Geral, constituidos en su mayor parte por roca basáltica. Sin embargo, en el sitio del proyecto PCH Foz do Estrela, a pesar de que el Mapa Geológico de Brasil del año millonésimo de 2004 (CPRM 2004, Imagen 2) no identifica (quizás por la escala) camadas con una composición química más ácida constituyente de riodacitas, estas representan la litología predominante en el sitio, coincidiendo con lo observado alrededor de la El. 650 en otros proyectos hidroeléctricos cercanos, ubicados en un nivel topográfico similar al de este PCH.

Imagem 2. Imagem tomada de la Folha Curitiba (1:1.000.000). Formación Serra Geral (Kf₁sb) y principales orientaciones estructurales NE y NW.

La región que aloja la planta hidroeléctrica muestra una fuerte compartimentación estructural, con direcciones principales siguiendo las orientaciones N40° a 70°W y N50° a 70°E, lo que afecta la geomorfología local a través de lineamientos estructurales y alineamientos de vertientes, quebradas y valles, incluyendo el desarrollo de los ríos Iratim y Estrela (Imagen 3).

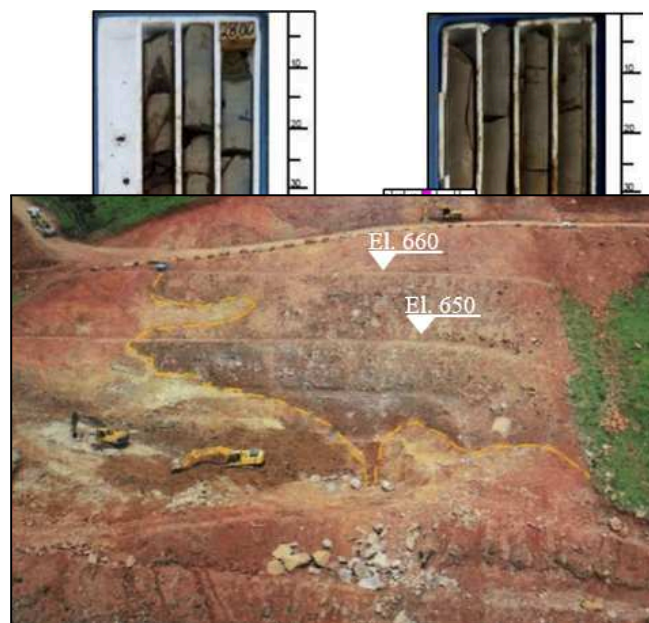
Imagen 3. Imagen aérea del emplazamiento del PCH Foz do Estrela que muestra el condicionamiento estructural en la alineación de los rasgos morfológicos (pendientes, quebradas, valles y crestas).

Otro fenómeno que ocurre comúnmente en el macizo rocoso de bordes de valles fluviales encajados es el alivio de la carga litostática asociada con el proceso de entalle del río. Este alivio resulta en un sistema de fracturas por tracción (atectónicas), subparalelas a la superficie del terreno natural y también actúa sobre la descompresión de sistemas de fracturas en el macizo rocoso, especialmente aquellas con dirección subparalela al valle del río. La descompresión de fracturas existentes se puede observar en los testigos de perforación donde son comunes los planes de fractura alterados y oxidados, combinado con una conductividad hidráulica relativamente alta en profundidad (Imagen 4).

Imagen 4. Ejemplos de sondeos con planos de fractura subverticales abiertos y oxidados asociados a tramo de alta conductividad.

2.1 Características de los materiales arriba de la roca

Una vez expuesto el macizo, se comprobó in situ la variación de la posición espacial de las superficies de los topes de rocas sanas y descompuestas, tanto en elevación como en planta, en relación con el previsto durante la elaboración del Proyecto Básico Consolidado (PBOC).



En la región de la Casa de Máquinas, por ejemplo, la ausencia de roca descompuesta y sana en la posición planificada obliga evaluarse alternativas para adecuar la disposición de esta estructura a la real condición rocosa. Además de eso, el material expuesto en los taludes mostró una gran heterogeneidad (Imagen 5), haciéndose necesario categorizar los diferentes tipos de suelo y determinar los parámetros geotécnicos específicos de cada uno. Imagen 5. Vista general frontal del talud de la Casa de Máquinas.

2.1.1 Compartimentación de los tipos de suelos

Para categorizar los diferentes tipos de suelo presentes tanto en las pendientes de la Casa de Máquinas como en la región de la Bocatoma, se hizo una evaluación de las descripciones de un total de 1.320 m de testigos de sondeos (entre mistas y rotativas) con sus respectivas fotografías.

De los aspectos visuales combinados con las características correspondientes descritas en los perfiles de sondaje, se identificó 4 clases distintas de materiales que recubren el horizonte del



macizo rocoso. Se sabe que tales características están directamente asociadas con el origen e historia evolutiva de los materiales, por lo que intentaremos identificarlos por sus respectivas apariencias más que clasificarlos según la interpretación genética correspondiente. Las 4 clases se presentan a continuación:

Imagen 6. Diferentes clases de suelo caracterizadas por los sondeos.



- Horizonte H1 (suelo marrón)
- Horizonte H2 (suelo rojizo)
- Horizonte H3 (suelo rojizo con trozos de roca)
- Horizonte H4 (trozos de roca)

De estos análisis se concluyó que los espesores promedios de las clases de suelo, asociadas a cada estructura del proyecto, serían como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de los espesores promedios de materiales por estructura.

Zona	Espesor promedio (m)			
	H1	H2	H3	H4
Presa	1,18	3,27	5,06	3,18
Túnel de Desvío	1,09	5,38	0,95	2,00
Bocatoma	0,94	6,13	8,40	16,33
Túnel Aducción	1,79	6,80	8,23	6,11
Casa de Máquinas	0,97	4,66	0,00	3,93

2.1.2 Posición del límite superior de la roca por sondeos

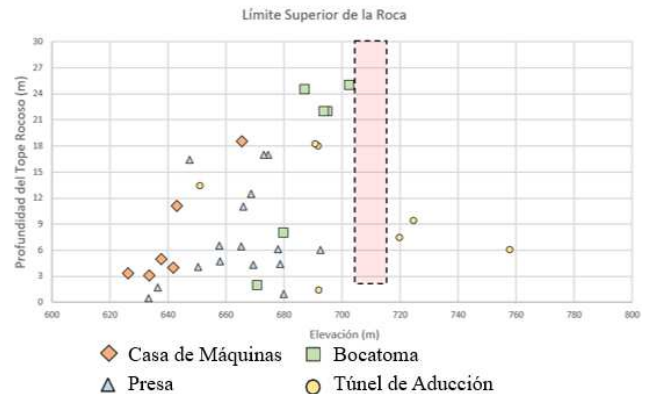
Para determinar la posición del límite superior de la roca se consideró como criterio la propiedad de excavabilidad del material, es decir, la profundidad mínima a partir de la cual sólo se puede realizar la excavación mediante el uso sistemático de explosivos. Para identificar este límite se consideró las características de los materiales recuperados mediante perforaciones mecánicas y descritos en los respectivos registros.

Los sondeos realizados en la Bocatoma y la Casa de Máquinas muestran que la profundidad de la superficie rocosa es directamente proporcional a la elevación del terreno. En otras palabras, cuanto mayor es la elevación de la superficie sobre la que se realizó el sondaje, más profundo se revela el tope rocoso. Este comportamiento aparece como una tendencia más discreta en

los sondeos realizados en la Presa (margen derecha e izquierda) y en el Túnel de Aducción. Sin embargo, esta correlación sólo tiene sentido para los estudios realizados abajo de la El. 710, ya que por encima de esta elevación topográfica se observa que el tope rocoso se eleva nuevamente, resultando en un espesor menor, entre 5 y 10 m. La Imagen 7 muestra gráficamente esta variación en la profundidad del límite superior de la roca con la elevación.

Se compararon los resultados con las condiciones reales presentadas en los sitios de la Casa de Máquinas y Bocatoma, y se concluyó que ambas tienen buena adherencia.

Imagen 7. Variación de la posición del tope rocoso en el proyecto.



3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD - GSI

Para un análisis de sensibilidad de los parámetros geotécnicos de los materiales, se realizó un estudio paramétrico respecto a los horizontes H3 y H4 llamados "Suelo rojizo con Trozos" y "Trozos de Roca", respectivamente, aplicando el sistema GSI (*Geological Strength Index*) basado en el material recuperado por medio de los sondeos rotativos. El estudio se limita a estos dos horizontes porque se considera que el comportamiento geotécnico de los horizontes H1 ("Suelo Marrón") y H2 ("Suelo Rojizo") se rige esencialmente por los conceptos de Mecánica de Suelos.

Los valores de GSI y otros parámetros considerados para los horizontes H3 y H4, así como la cohesión (c) y el ángulo de fricción (Φ) resultantes del análisis de sensibilidad, se presentan en la Imagen 8 y en la Tabla 2. Dichos resultados fueron considerados como un indicador de orden de magnitud para su posterior comparación con los valores derivados de la correlación de MASW con SPT.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS		SURFACE CONDITIONS				
From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis		STRUCTURE				
		DISINTEGRATED - Poorly inter-locked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				
		VERY GOOD Very rough, fresh, unweathered surfaces				
		GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces				
		FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces				
		POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coating or fillings of angular fragments				
		VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings				
		DECREASING SURFACE QUALITY				
		H3 H4				

Imagen 8. Valores GSI adoptados para H3 y H4. (Tabla modificada)

Tabla 2. Análisis de sensibilidad paramétrica para el horizonte H3 e H4.

Parámetro		H3	H4
Hoek Brown Classification	σ_{ci} :	100 MPa	100 MPa
	GSI:	10	15
	mi:	20	20
	D:	0	0
	Ei:	45.000 MPa	45.000 MPa
	MR:	450	450
Hoek Brown Criterion	mb:	0,804	0,961
	s:	4,54E-05	0,0001
	a:	0,585	0,561
Mohr-Coulomb Fit	c:	0,201 MPa	0,256
	ϕ :	47,89	51,05

4 EMBASAMENTO CONCEPTUAL

Con el objetivo de comprender el modelo geológico-geotécnico, caracterizando la ocurrencia de horizontes con predominio de bloques y una matriz limo-arenosa, se propuso por el consultor de ELERA (la propietaria de la PCH Foz do Estrela) una prospección geofísica por el método sísmico MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) que provee un perfil de velocidad de la onda de cizalla tipo S (V_s) a partir del cual es posible evaluar indirectamente la resistencia y la capacidad portante de los materiales a través de un perfil vertical, con capas alternas de alta velocidad (pequeños bloques de roca descompuesta) y baja velocidad (matriz terrosa).

El Eurocódigo 8 (EC8) presenta directrices para el diseño de estructuras sismorresistentes y, entre ellas, una tabla que

Ground type	Description of stratigraphic profile	Parameters		
		$V_{s, 30}$ (m/s)	N_{SPT} (blows/30cm)	c_u (kPa)
A	Rock or other rock-like geological formation, including at most 5 m of weaker material at the surface.	> 800	-	-
B	Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least several tens of meters in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth.	360 - 800	> 50	> 250
C	Deep deposits of dense or medium-dense sand, gravel or stiff clay with thickness from several tens to many hundreds of meters.	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil.	< 180	< 15	< 70
E	A soil profile consisting of a surface alluvium layer with v_s , values of type C or D and thickness varying between about 5 m and 20 m, underlain by stiffer material with $v_s > 800$ m/s.			
S ₁	Deposits consisting, or containing a layer at least 10 m thick, of soft clays/silts with a high plasticity index ($PI > 40$) and high water content.	< 100 (indicative)	-	10 - 20
S ₂	Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A - E or S ₁ .			

proporciona requisitos para la clasificación de sitios, como se muestra en la Imagen 9.

Imagen 9. Correlaciones EC8 entre características geotécnicas y velocidades de onda S (V_s).

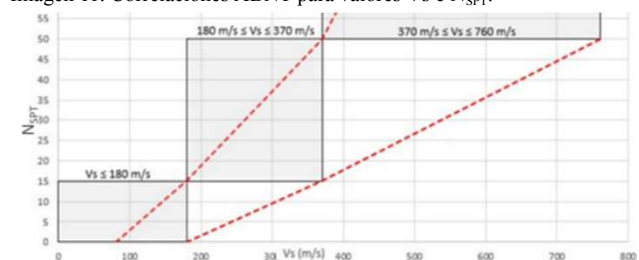
La Norma Brasileña ABNT NBR 15241 es análoga a la EC8. Esta indica los requisitos para estructuras de construcción civil con relación a acciones sísmicas. Presenta un panorama similar, con alguna variación en los valores de V_s , como muestra la Imagen 10.

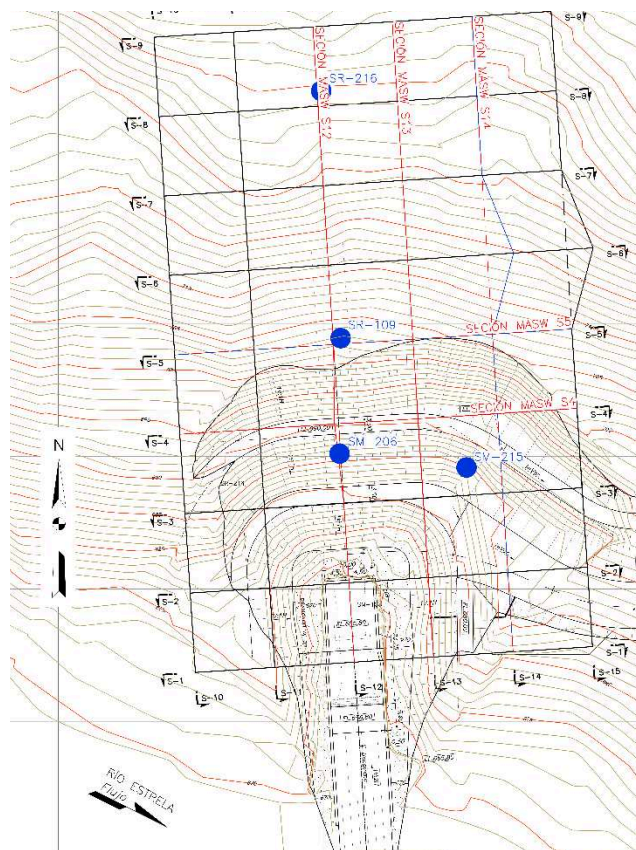
Classe do terreno	Designação da classe do terreno	Propriedades médias para os 30 m superiores do terreno	
		$\bar{V}_s$	$\bar{N}$
A	Rocha sã	$\bar{V}_s \geq 1\,500$ m/s	(não aplicável)
B	Rocha	$1\,500$ m/s $\geq \bar{V}_s \geq 760$ m/s	(não aplicável)
C	Rocha alterada ou solo muito rígido	760 m/s $\geq \bar{V}_s \geq 370$ m/s	$\bar{N} \geq 50$
D	Solo rígido	370 m/s $\geq \bar{V}_s \geq 180$ m/s	$50 \geq \bar{N} \geq 15$
E	Solo mole	$\bar{V}_s \leq 180$ m/s	$\bar{N} \leq 15$
F	-	Qualquer perfil, incluindo camada com mais de 3 m de argila mole	
		1 Solo exigindo avaliação específica, como:	
		2 Solos vulneráveis à ação sísmica, como solos liquefáveis, argilas muito sensíveis e solos colapsíveis fracamente cimentados;	
		3 Turfa ou argilas muito orgânicas;	
		4 Argilas muito plásticas;	
		5 Estratos muito espessos (≥ 35 m) de argila mole ou média.	

Imagen 10. Correlaciones ABNT entre características geotécnicas (N_{SPT}) y velocidades de onda S.

En las dos imágenes anteriores se ofrecen valores límites para rangos de correlaciones entre la velocidad de la onda S y las propiedades geotécnicas de los materiales. La Imagen 11 muestra el rango de valores ABNT y las líneas mínima y máxima definidas por estos.

Imagen 11. Correlaciones ABNT para valores V_s e N_{SPT} .

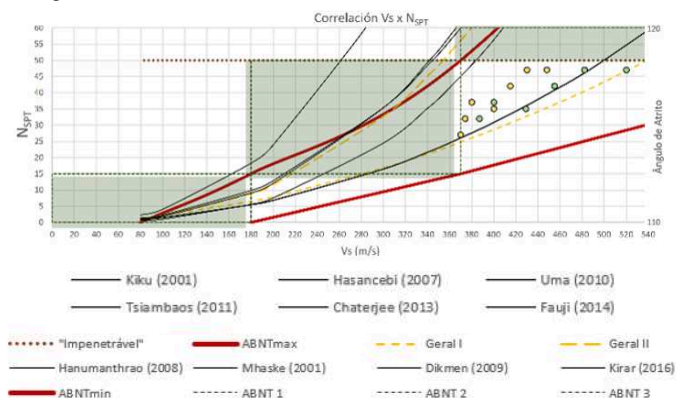




En la literatura internacional, especialmente en países susceptibles a eventos sísmicos, existen numerosos trabajos, como Naik, S.P. *et al* (2014) y Anbazhagan, P. *et al* (2016), que establecen la correlación entre V_s y N_{SPT} , ofreciendo ecuaciones matemáticas correspondientes. El gráfico de la Imagen 12 muestra algunas de estas correlaciones junto con las correlaciones ABNT.

Junto con las directrices de la Norma ABNT, este es el universo de correlaciones considerado para la evaluación de los tramos MASW realizados en el sitio de la Bocatoma y la Casa de Máquinas del PCH Foz do Estrela.

Imagen 12. Correlaciones V_s x N_{SPT} existentes en la literatura



internacional y ABNT. Máximo y mínimo indicado en líneas rojas.

4.1 Tope rocoso y Velocidades Secundarias (V_s)

Para evaluar la correlación del tope rocoso con la velocidad de la onda S (V_s) se utilizaron las investigaciones presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Sondeos considerados para correlaciones con secciones MASW.

Estructura	Sección sísmica MASW	Sondeo
Bocatoma	S4,S5,S12,S13,S14	SR109,R206 SR215,SR216
Casa de Máquinas	S4,S5,S6,S14,S19	SR210,SR211

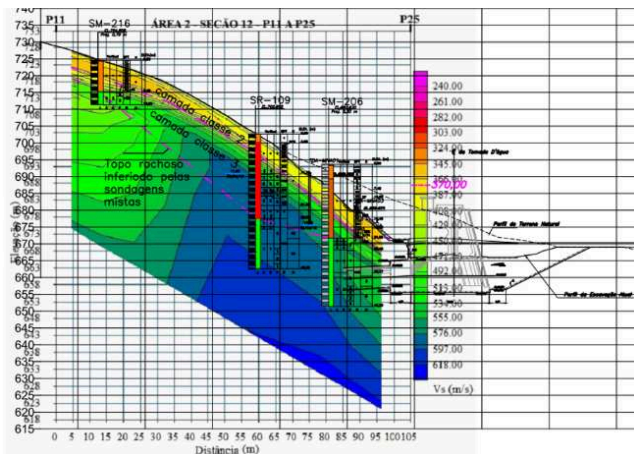
Las Imágenes 13 y 14 muestran en plano la región de la Bocatoma y Casa de Máquinas, respectivamente, con la ubicación de las investigaciones consideradas.

Imagen 13. Investigaciones consideradas para evaluar correlaciones paramétricas en la Bocatoma.

Imagen 14. Investigaciones consideradas para evaluar correlaciones paramétricas en la Casa de Máquinas.

En las Imágenes 15 y 16 se presentan ejemplos de secciones sísmicas de MASW 2D con la indicación de sondeos y la interpretación de los horizontes correspondientes a las capas de suelo.

Imagen 15. Interpretación de diferentes capas de materiales con distintos



parámetros geotécnicos superpuestos a la sección sísmica de la Bocatoma.

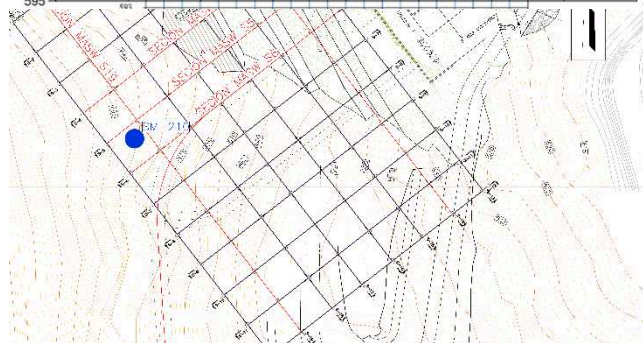
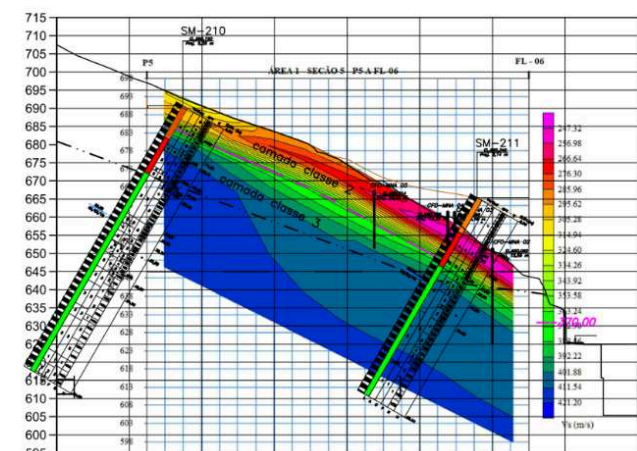


Imagen 16. Interpretación de diferentes capas de materiales con distintos parámetros geotécnicos superpuestos a la sección sísmica de la Casa de Máquinas.

Las tablas 4 y 5 muestran los valores de Vs para el tope de roca obtenidos con la evaluación cruzada entre estas investigaciones en cada estructura.

Tabla 4. Velocidades Vs en la elevación del tope rocoso de la Bocatoma.

Sondeo	Tope de la roca (El.)	Vs (m/s) referente al tope rocoso				
		S-4	S-5	S-12	S-13	S-14
SM-109	677,61	-	700	576	-	-
SR-215	672,93	-	-	-	528	534
SM-206	671,68	670	-	555	-	-
SR-216	715,21	-	-	450	-	-

Tabla 5. Velocidades Vs en la elevación del tope rocoso de la Casa de Máquinas.

Sondeo	Tope de la roca (El.)	Vs (m/s) referente al tope rocoso				
		S-4	S-5	S-6	S-14	S-19
SM-211	642,97	-	400	-	450	-
SR-210	672,53	-	410	-	-	485

Es interesante señalar que los valores de las velocidades del tope rocoso en la Bocatoma se presentan generalmente mayores que sus análogos en la Casa de Máquinas, lo que puede estar asociado, además de la ocurrencia de diferentes litotipos, con una condición de menor confinamiento litostático. Según la experiencia de la empresa *Geophysical Consulting & Services*, que realizó los servicios de MASW 2D en la PCH Foz do Estrela, la proximidad a la superficie, el material está menos confinado y eventualmente más alterado por tratarse de material residual que resulta en una mayor disipación de las ondas sísmicas, resultando en una menor respuesta Vs. La influencia de la topografía de la región en los resultados de Vs también es un hecho que afecta los resultados de Vs, según referenciado en la bibliografía (ABGE, 1998). Finalmente, los valores de VS considerados para reflejar el nivel superior de la roca fueron:

- Bocatoma: Vs = 575 m/s
- Casa de Máquinas: Vs = 450 m/s

Estos valores se utilizaron para establecer el nivel superior de la roca en secciones sísmicas donde no existe correlación directa con sondeos rotativos.

4.2 Ensayos N_{SPT} y V_s

Por encima del tope rocoso se encuentran los materiales excavables mecánicamente que corresponden a los estratos cuya parametrización se obtuvo con base en perfiles geofísicos.

Considerando las dos campañas de reconocimiento directo realizadas en las zonas de las principales estructuras del proyecto (Bocatoma y Casa de Máquinas), se llevaron a cabo 126 ensayos del tipo SPT a lo largo de los estratos de suelo arriba de la roca. El gráfico de la Imagen 17 muestra los resultados de estas pruebas en función de la profundidad a la que se realizaron.

En este universo de muestreo, algunos valores se relacionan a ensayos que no se alcanzaron los 45 cm de penetración requeridos para la prueba SPT. Además, algunos puntos muestran valores N_{SPT} externos o anómalos a la nube debido a resultaren muy altos

o bajos en relación con la profundidad respectiva. Despreciando estos extremos, los valores de SPT se distribuyen en función de la profundidad como se muestra en los gráficos de las Imágenes 18 y 19.

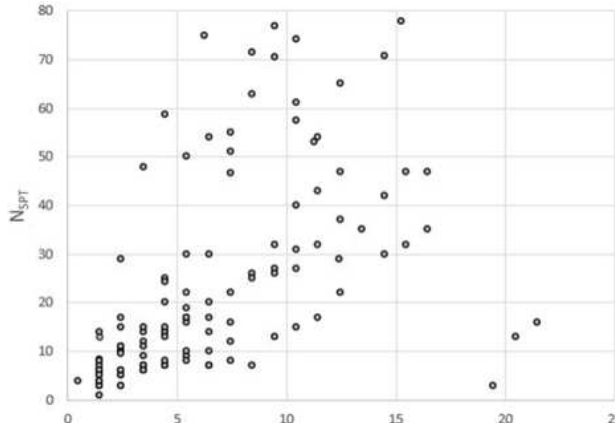


Imagen 17. Resultados de todas las pruebas SPT realizadas en la obra del PCH Foz do Estrela.

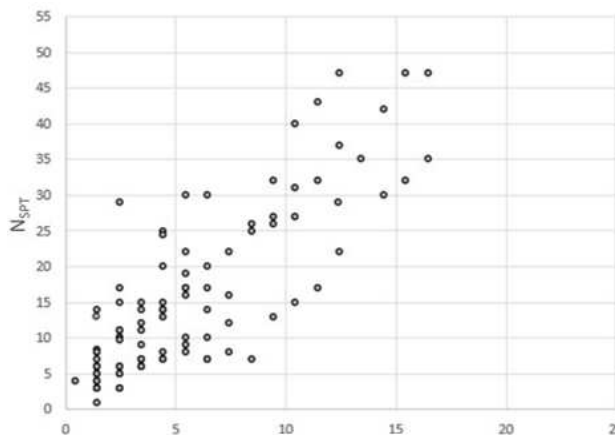


Imagen 18. Gráfico de correlación entre N_{SPT} y profundidad válidos para el proyecto.

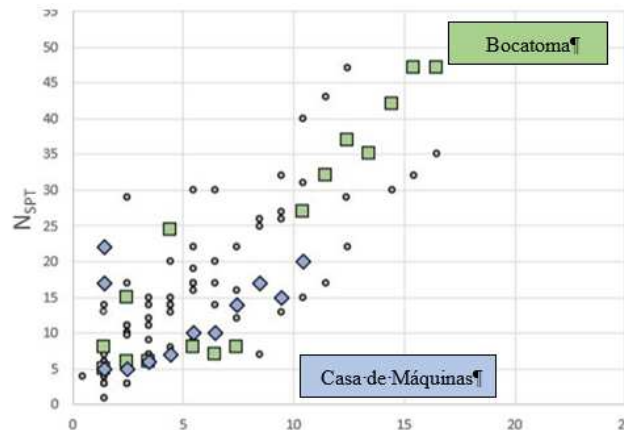
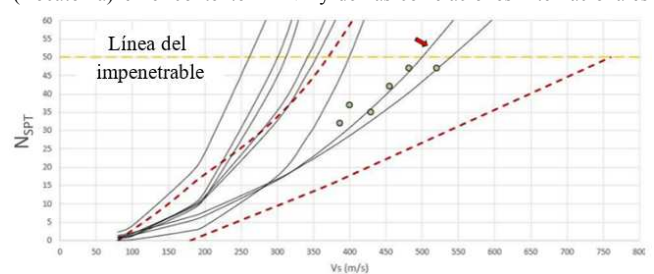


Imagen 19. Relación N_{SPT} y profundidad con identificación de los resultados de las pruebas realizadas en las regiones de Bocatoma y Casa de Máquinas.

Los gráficos indican la existencia de una correlación directa sesgada entre profundidad y N_{SPT} : cuanto más profundo sea el sitio de prueba N_{SPT} , mayor será su resultado. En la Imagen 19 se observa que los materiales de la Bocatoma tienen una resistencia a la penetración similar a los de la Casa de Máquinas hasta una profundidad - 7 m. Para ensayos a profundidades superiores a los 8 m, los valores de resistencia se distinguen en estas dos estructuras, consistentes con las diferentes litologías observadas.

Entre los sondeos realizados restringidos a la región en que se hizo las secciones sísmicas del MASW 2D, solo en SM-206 (Bocatoma) se realizaron pruebas del SPT en el suelo de recubrimiento al macizo rocoso y, debido a su posición, los resultados de N_{SPT} se pueden correlacionar con las secciones S4 y S12. El siguiente gráfico (Imagen 20) muestra los pares $N_{SPT} \times V_s$ de esta correlación en el contexto de las correlaciones indicadas por ABNT y otras bibliografías, como ya presentó la Imagen 12.



(Imagen 12).

Los puntos $N_{SPT} \times V_s$ de PCH Foz do Estrela están bien insertados, a medio camino entre los límites máximo y mínimo de la Norma ABNT. En las correlaciones internacionales, los puntos se acercan a la correlación presentada por Hanumathrao 2008 (Imagen 22), cuya ecuación es (Ec. 1):

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{82,6} \right)^{2,325} \quad (1)$$

La correlación entre el N_{SPT} y el ángulo de fricción (ϕ), según Teixeira (1996), puede expresarse mediante la ecuación (Ec. 2):

$$\Phi(^{\circ}) = \sqrt{20 \cdot N_{SPT}} + 15 \quad (2)$$

Respecto a la cohesión (c), la correlación es mucho más empírica y se estima corresponder a la mitad de la resistencia a la compresión deducida por N_{SPT} , como se ejemplifica en la Tabla 6.

Tabla 6. Correlación entre N_{SPT} y la compresión y cohesión según Terzaghi Y Peck (1948).

Consistencia	N_{SPT}	Resistencia a la compresión kg/cm^2	Cohesión kg/cm^2
Muy blando	≤ 2	0 - 0,25	0 - 0,125
Blando	3 - 4	0,25 - 0,50	0,125 - 0,25
Media	5 - 8	0,50 - 1,00	0,25 - 0,50
Rija	9 - 15	1,00 - 2,00	0,50 - 1,00
Muy rija	16 - 30	2,00 - 4,00	1,00 - 2,00
Dura	> 30	$> 4,00$	$> 2,00$

La correlación de N_{SPT} con la cohesión se demuestra por la siguiente ecuación (Ec. 3):

$$c(kPa) = 6,484 \cdot N_{SPT} - 2,204 \quad (3)$$

Con base en estas ecuaciones y considerando los valores promedio de V_s para cada horizonte de material caracterizado en las distintas zonas, la Tabla 7 presenta el ángulo de fricción (ϕ) y cohesión (c) estimados para las respectivas velocidades (V_s), según algunas referencias bibliográficas, sea para el Horizonte 2 (H2 - “Suelo Rojizo”) como para el Horizonte 3 (H3 - “Suelo Rojizo con trozos de roca”), que albergan los taludes de la Bocatoma y la Casa de Máquinas.

Tabla 7. Parámetros geotécnicos estimados para la Bocatoma y Casa de Máquinas por medio de correlaciones de N_{SPT} y V_s .

Estructura	Horizonte	$V_s(m/s)$	ABNT _{media}		Hanumathrao (2008)	
			$\phi(^{\circ})$	$c(kPa)$	$\phi(^{\circ})$	$c(kPa)$
Bocatoma	H2	180-370	34	117	33	100
	H3	370-575	46	311	46	302
Casa de Máquinas	H2	180-370	34	117	33	100
	H3	370-450	42	238	41	211

3 CONCLUSIONES

- La campaña de geofísica cumplió con el objetivo propuesto. Fue posible realizar una evaluación integrada de las secciones sísmicas MASW y estimar los parámetros geotécnicos de los materiales que albergan las excavaciones a cielo abiertas a partir de las correlaciones entre las velocidades de las ondas secundarias y los resultados de las pruebas SPT realizadas en los sondeos de las 2 campañas de investigación geológica (2013 e 2018);
- Se utilizaron las directrices ABNT NBR 15241 y otras correlaciones entre N_{SPT} y V_s obtenidas de referencias internacionales, provenientes de países sujetos a terremotos;
- Las velocidades de onda secundaria V_s para los límites de roca son inferiores a los valores comúnmente citados en las bibliografías, lo que puede estar asociado con la condición del relieve litostático existente en las vertientes de los ríos Iratim y Estrela. Otra posibilidad, que no distorsiona la primera, es la probable influencia de las pendientes topográficas en los resultados de los estudios geofísicos;
- El nivel del tope rocoso en la región de Bocatoma muestra un valor V_s superior al asociado al límite superior de roca de la Casa de Máquinas, lo que también puede estar asociado al hecho de que cada localidad se inserta en diferentes litotipos, y eventualmente en diferentes flujos volcánicos;
- Los resultados de las pruebas SPT asociados a los valores de V_s se muestrearon dentro del esperado, consistentes con el factor de variación establecido por la ABNT. Entre las correlaciones internacionales se seleccionó la que más se acerca a los valores locales del N_{SPT} ;
- Por medio de las correlaciones realizadas, y considerando los valores promedios de V_s además de las ecuaciones de correlación habituales entre N_{SPT} , ángulo de fricción (ϕ) y cohesión (c), se obtuvieron estimaciones de estos parámetros para los distintos horizontes de suelo que ocurren por sobre el tope de roca en la zona de la Bocatoma y Casa de Máquinas;
- La estimación de parámetros geotécnicos realizada a través del GSI ofrece una indicación de orden de magnitud, pero se debe tener mucha precaución al utilizar estos valores, ya que

resultaron significativamente superiores a los parámetros determinados por correlación sísmica, especialmente en lo que se refiere al ángulo de fricción (ϕ);

- Objetivamente, la realización de la campaña sísmica puede orientar la definición del modelo estratigráfico del macizo y los parámetros de resistencia para contribuir eficazmente a los cálculos de estabilidad y definición del proyecto.

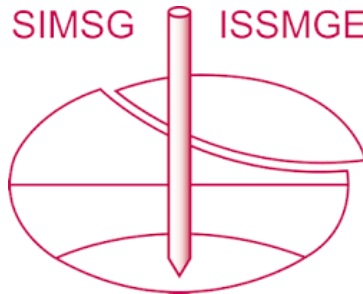
4 AGRADECIMIENTOS

Se registra aquí especial agradecimiento a la empresa ELERA Renováveis, propietaria de la PCH Foz do Estrela, y a la constructora QUEBEC, que autorizaron el uso de las informaciones para aportes técnico-científicos.

5 REFERENCIAS

- ABGE 1998. Geologia de Engenharia. Oliveira, A.M.S.; Brito, S.N.A (editores). São Paulo: ABGE, 1998, 576p.
- Anbazhagan P., Anjali Uday, Sayed S. R. Moustafa, Nassir S. N. Al-Arifi. 2016. Correlation of densities with shear wave velocities and SPT N values. - *Journal of Geophysics and Engineering*, Volume 13, Issue 3.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 15421. 2006. Projeto de estruturas resistentes a sismos - procedimentos. 1 ed. Rio de Janeiro.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2004. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Asunción: folha SG.21 - Curitiba: folha SG.22. Brasília. Escala 1:1.000.000. *Programa Geologia do Brasil*.
- EUROCODE 8. 2010. EN 1998-1: Design of structures for earthquake resistance - General rules, seismic actions and rules for buildings. Commission of the European Community, 2010.
- Hanumantharao, C. and Ramana, G.V. (2008). Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India. J. Earth Syst. Sci. 117, S2, November 2008, pp. 719-730.
- Marinos P., Marinos V., Hoek E. 2007. Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. Published in: Underground works under special conditions, eds. Romana, Perucho & Olalla, 13-21. Lisbon: Taylor and Francis
- Naik, S.P. et al. 2014. Spatial distribution of shear wave velocity for late quaternary alluvial soil of Kanpur City, Northeast India.
- Terzaghi, K.; Peck, R.B. 1948. Soils mechanics in engineering practice. 2 ed. New York, John Wiley & Sons, 1948.
- Teixeira, A. H. (1996). Projeto e execução de fundações. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE, São Paulo, v.1, p. 33-50.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.