Categoria V: Disposição de Rejeitos e Estéreis
Eixo temático: Gestão de Riscos em Disposição de Rejeitos e Estéreis

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Monitoramento integrado de barragens de rejeitos: aplicação de métodos geofísicos na barragem BL-1

MOSAIC

Ewerton Rodrigues
Pedro Leite
Igor Gama
Marco Braga
João Paulo Barros

Mosaic Company

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

- É uma empresa do setor de **mineração e produção de fertilizantes**, sendo a maior produtora global de fosfatados e potássio combinados, fornecendo fertilizantes para 40 países. No Brasil, a empresa possui mais de **4.000 colaboradores**, distribuídos entre as suas unidades.

- Classificação Nacional de Atividades Econômicas **(CNAE): 20.13-4-02 - Mosaic Fertilizantes do Brasil Ltda.** - Fabricação de adubos e fertilizantes, exceto organominerais. Em função de suas atividades de mineração, a empresa está enquadrada no **Grau de Risco 4**, correspondente ao nível máximo de risco.

Mosaic®

Sala de Monitoramento Integrado (SMI)

1.551
Total de instrumentos



25

Estruturas de armazenamento de rejeitos monitoradas pela SMI



Desafio

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Segurança de barragens é um dos principais desafios da mineração mundial

Instrumentação Geotécnica

- Excelente acompanhamento temporal
- Informações pontuais
- Limitação na cobertura espacial

Geofísica

- Investigação não invasiva
- Caracterização contínua em profundidade
- Maior cobertura espacial

Como integrar diferentes respostas geofísicas para transformar caracterização espacial em uma metodologia de monitoramento?

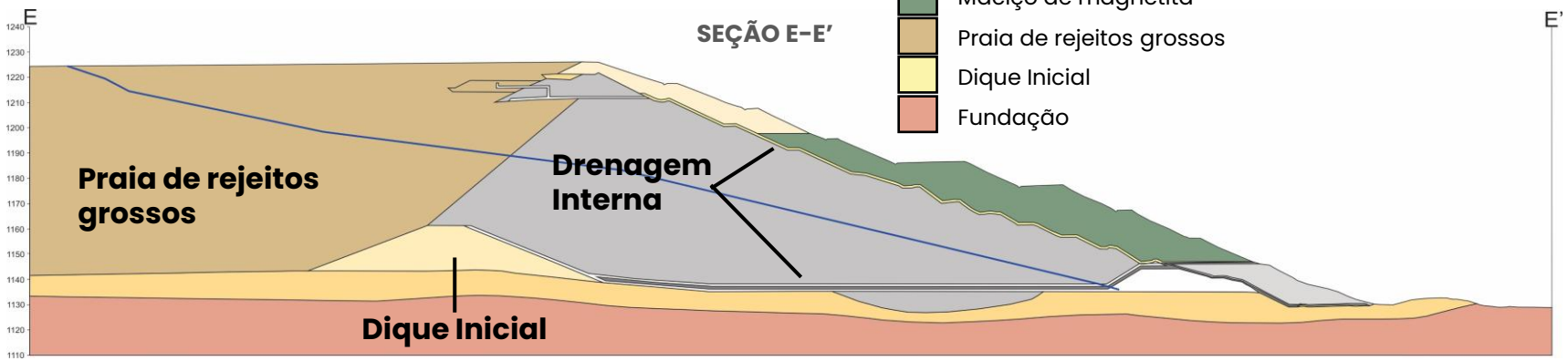
Mosaic®

CPG
Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada

Informações gerais BL-1

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026





98m
Altura

3.4 km
Comprimento da crista

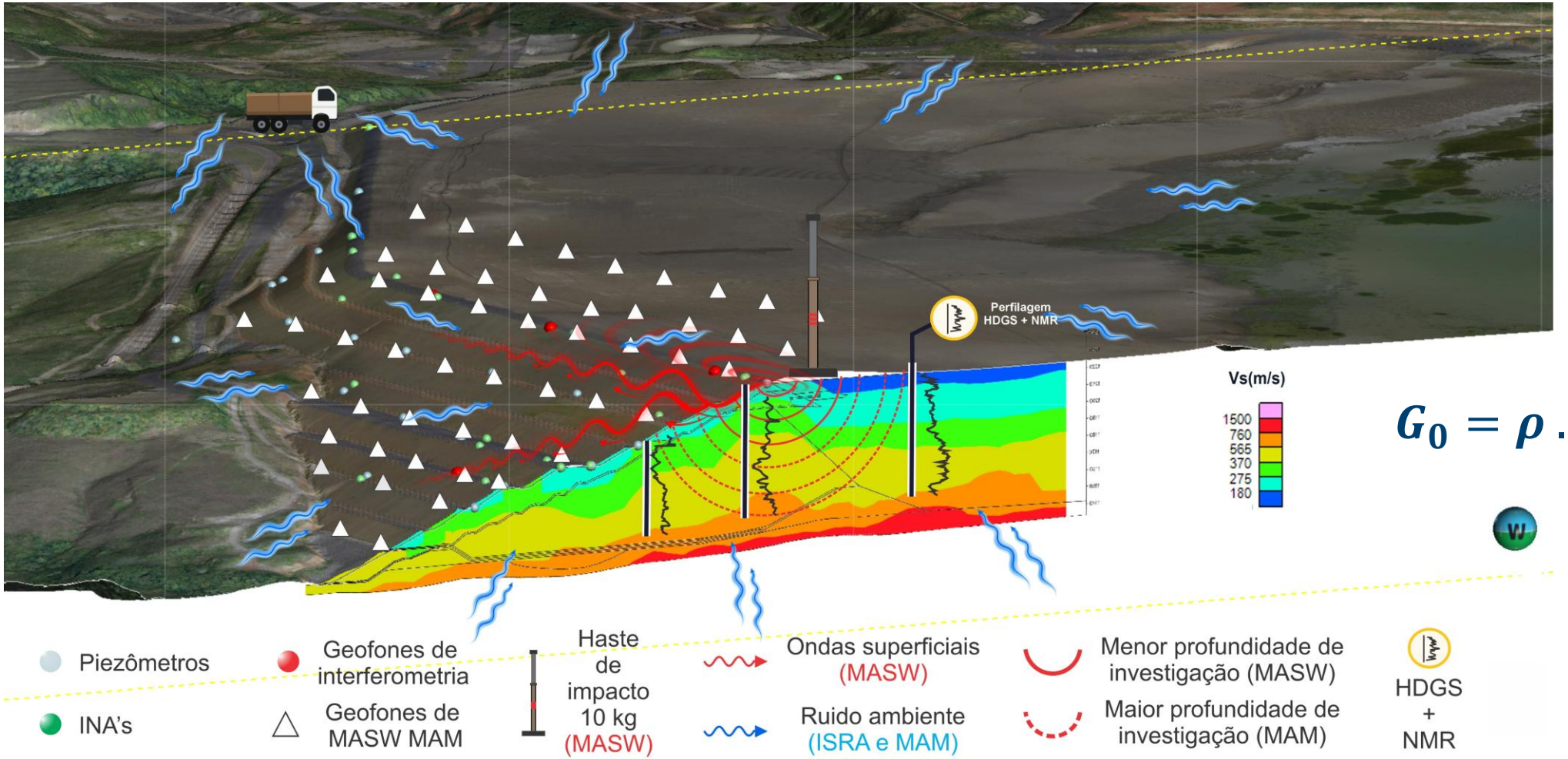
5.4 Mm²
Área do reservatório

Instrumentação	
Piezômetros	56
Indicadores de nível d'água	39
Marcos superficiais	34
Medidores de vazão (dreno de fundo)	06
Réguas linimétrica (reservatório)	02
Geofones de interferometria	08

4ª
maior barragem
America Latina
232,5 Mm³

Integração do monitoramento

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

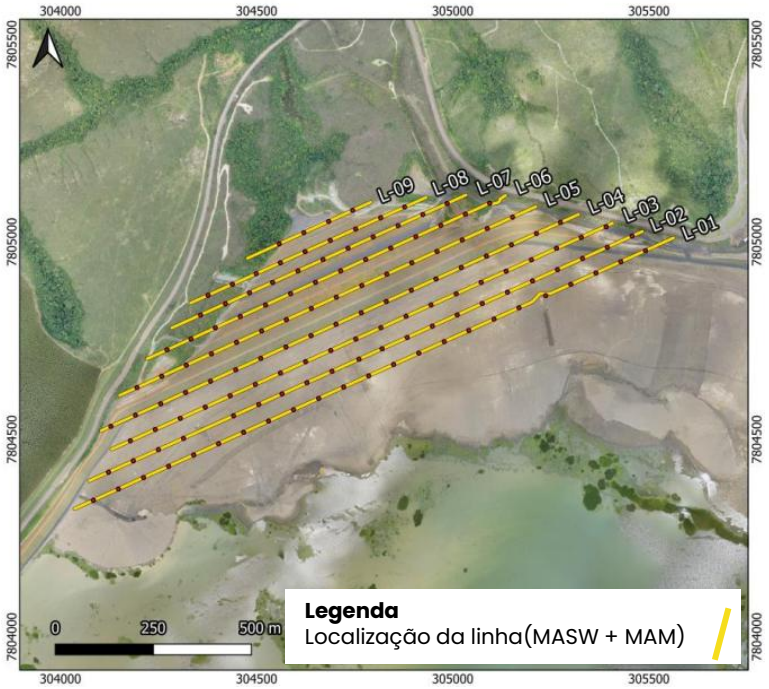


Sísmica – MASW

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Seção	Comprimento (m)
L-01	1681,69
L-02	1547,08
L-03	1402,57
L-04	1341,92
L-05	1166,50
L-06	1017,03
L-07	826,88
L-08	670,04
L-09	349,84





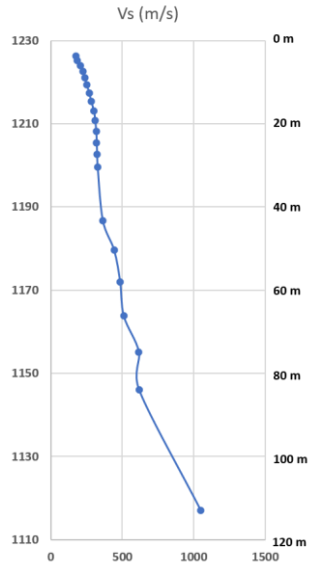
- Nove (09) seções sísmicas de MASW e MAM
- Espaçamento dos geofones 5m, exceto na L9 (2m)
- MASW – 24 geofones
- MAM – 22 geofones

Perfil 1D

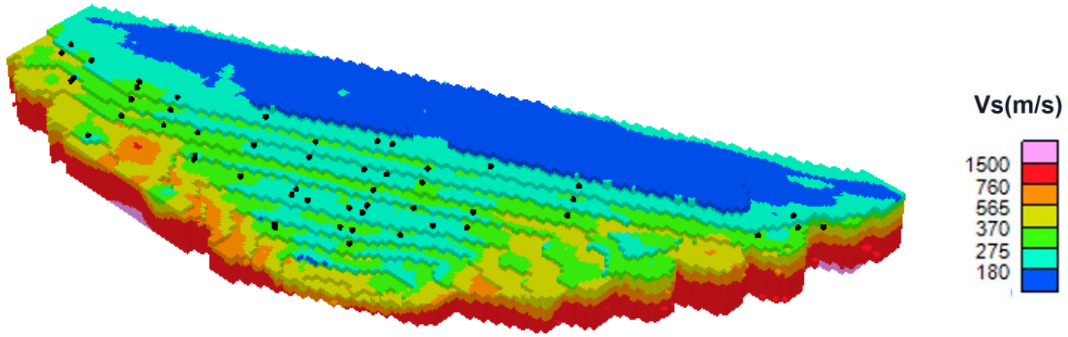
Elevação (m)	Vs (m/s)
1226,3	177,39
1225,23	185,45
1223,99	208,27
1222,59	222,86
1221,03	235,9
1219,29	251,69
1217,4	268
1215,34	282,06
1213,11	300,89
1210,72	310,44
1208,17	317,64
1205,45	320,57
1202,56	323,52
1199,51	327,24
1186,74	363,11
1179,57	442,66
1171,9	484,64
1163,75	509,85
1155,09	616,22
1145,94	618,02
1117,01	1049,24

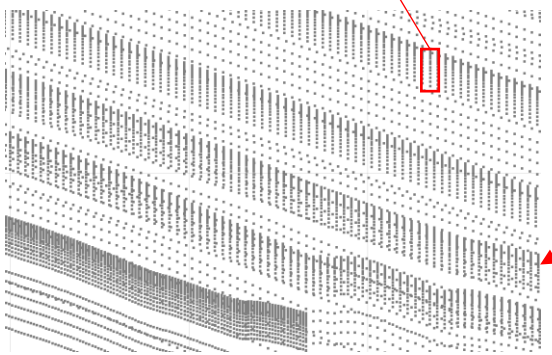
Sísmica - MASW

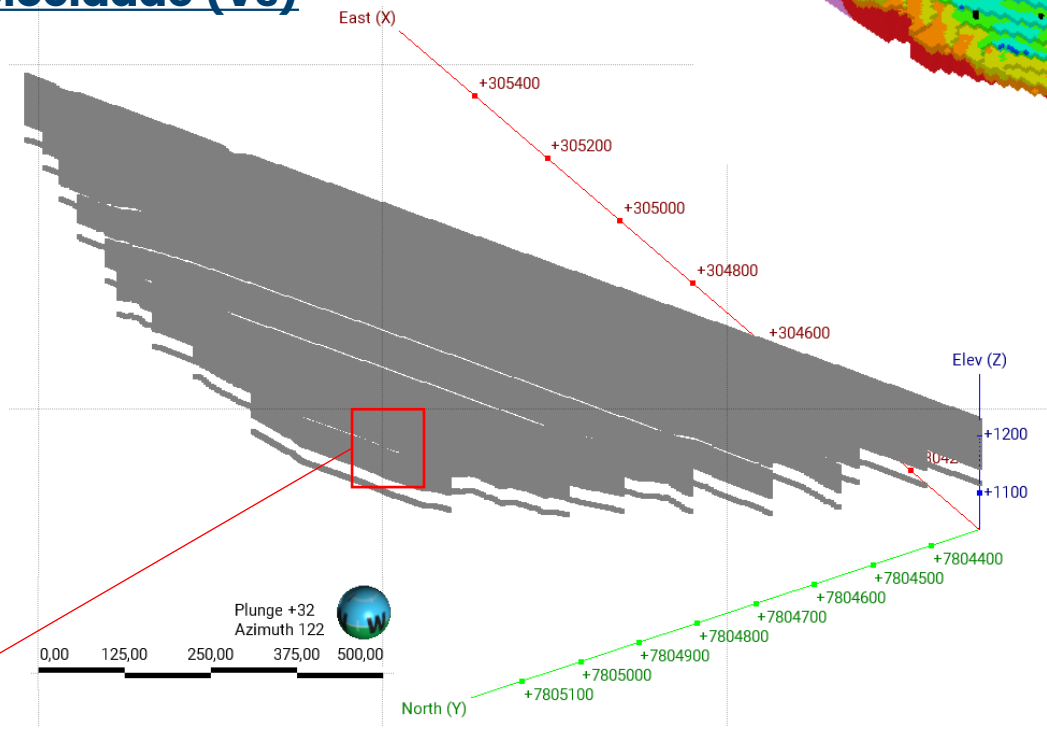
PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026



Mais de 44 mil pontos de velocidade (Vs)







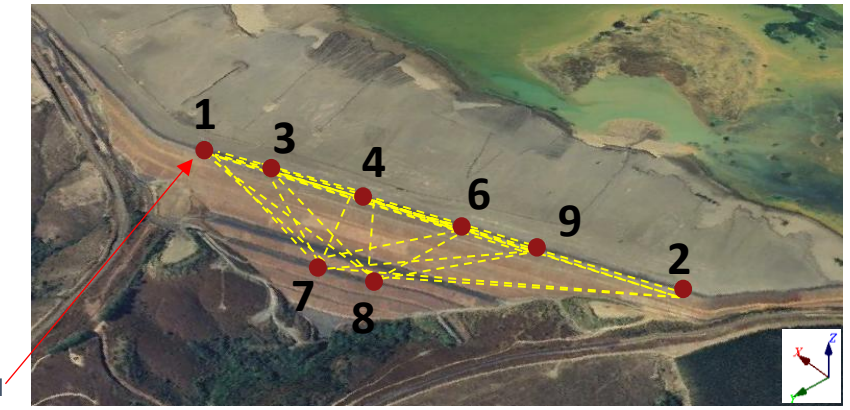
Vs30 - ABNT NBR 15421 (ABNT 2023)

Classe	Tipo de solo	Vs (m/s)
A	Rocha sã	≥ 1.500
B	Rocha	760 – 1.500
C	Rocha alterada ou solo muito rígido	370 – 760
D	Solo rígido	180 – 370
E	Solo mole	≤ 180

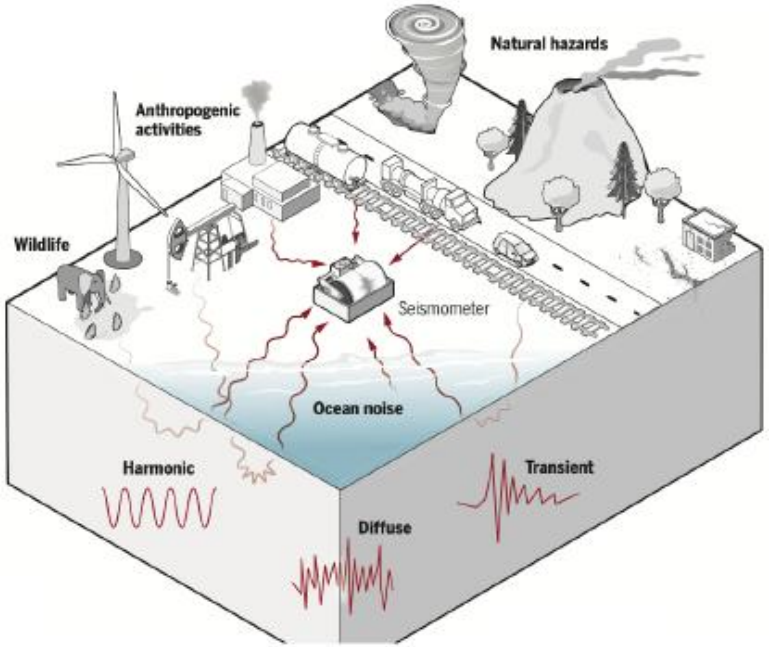
Interferometria – ISRA

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

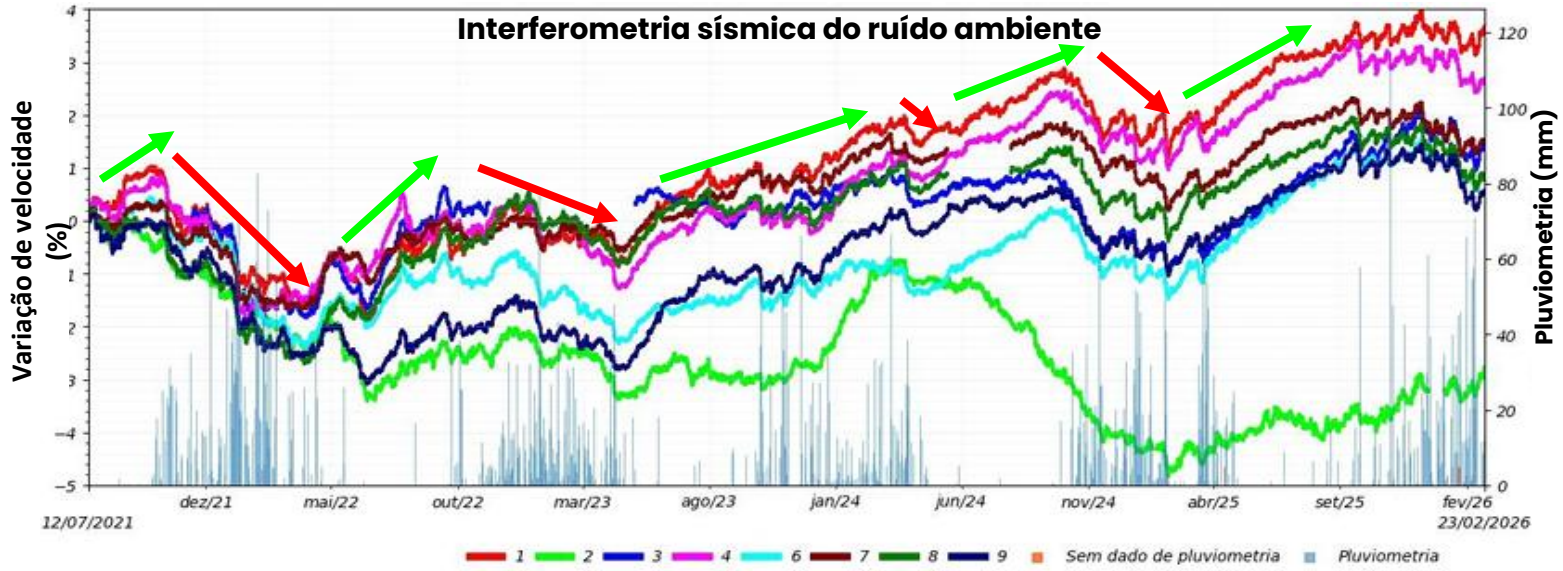
A interferometria sísmica de ruído ambiente (ISRA) permite monitorar continuamente variações na velocidade de propagação das ondas sísmicas, utilizando o ruído ambiente como fonte passiva.



● Geofone de interferometria



DENOLLE & NISSEN-MEYER (2020)



Perfilagem geofísica

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

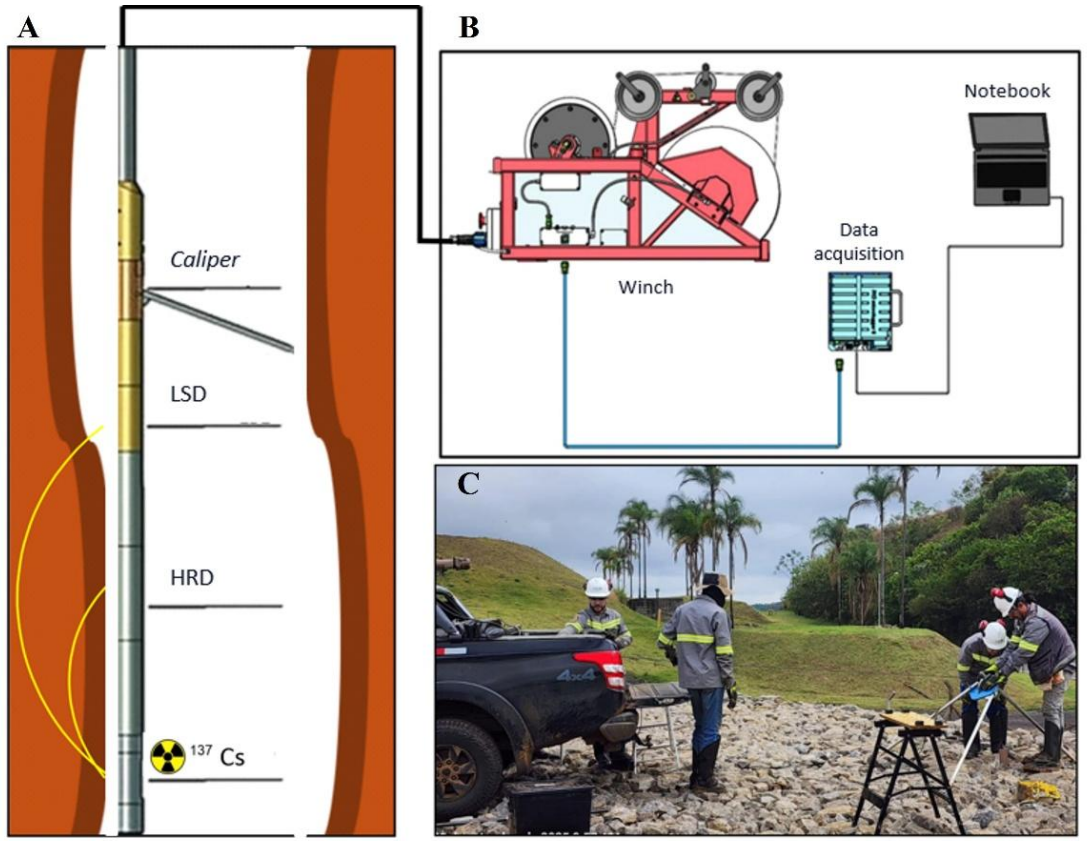
Realizadas em furos da Barragem BL-1

HDGS | Densidade

- Fonte selada de ^{137}Cs
- Perfil contínuo de densidade do material
- Resolução vertical centimétrica
- Contrastes de densidade ao longo do furo

NMR | Porosidade

- Resposta associada aos núcleos de hidrogênio
- Estimativa da porosidade e distribuição da água nos poros
- Aquisição ao longo do furo



Perfilagem geofísica

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Realizadas em furos da Barragem BL-1



Parâmetros geotécnicos (Vs_1 e G_0)

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25}$$

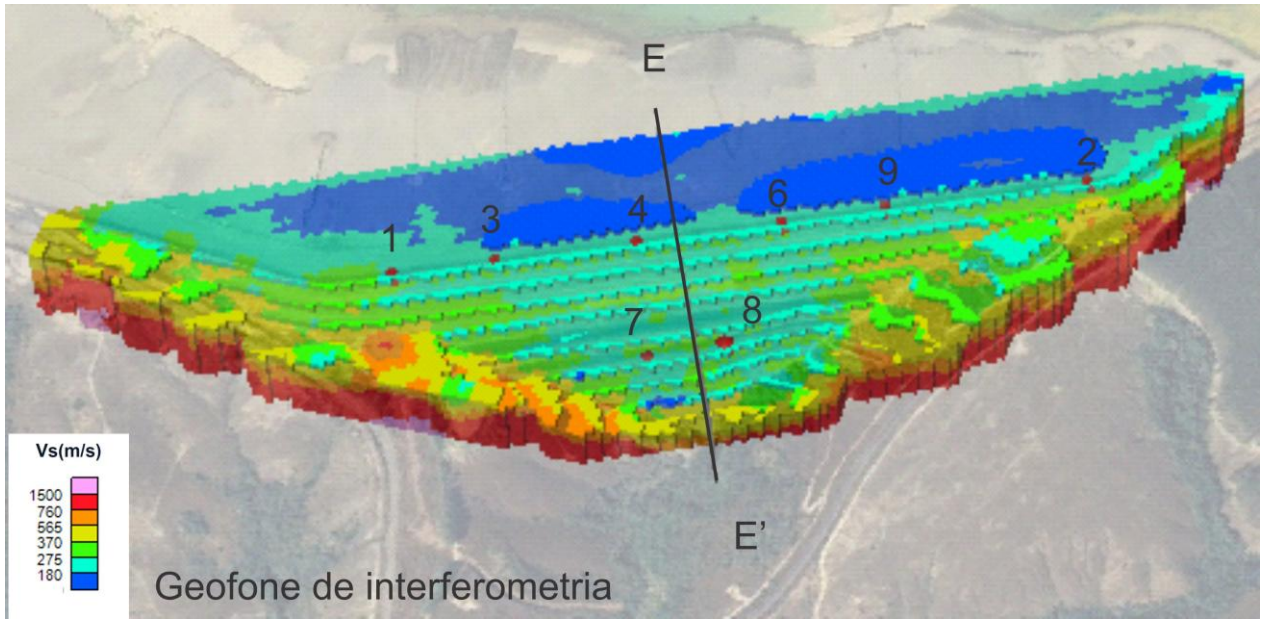
Onde: **Vs_1** é a velocidade normalizada das ondas de cisalhamento, **Vs** é a velocidade medida das ondas de cisalhamento, **P_a** é a pressão atmosférica de referência e **σ'_{v0}** corresponde à tensão vertical efetiva de sobrecarga.

$$G_0 = \rho \, . Vs^2$$

Onde: **G_0** é o módulo de cisalhamento, **ρ** é a densidade e **Vs** é a velocidade das ondas de cisalhamento.

Resultados

Modelo 3D em voxel da Vs, indicando a localização dos geofones do monitoramento por Interferometria.



Geofone	Média da Vs (m/s) para os intervalos de profundidade, na localização de cada geofone de interferometria.		
	0-30 m	30-60 m	60-90m
1	327,49	481	612,1
2	305,33	602	799,2
3	309,92	435,2	614,4
4	305,77	441,1	624,3
9	268,77	493,9	686,4
6	302,74	424,9	609,3
7	393,32	596,9	735,9
8	328,18	557,6	681,1

$$G_0 = \rho \, . Vs^2$$

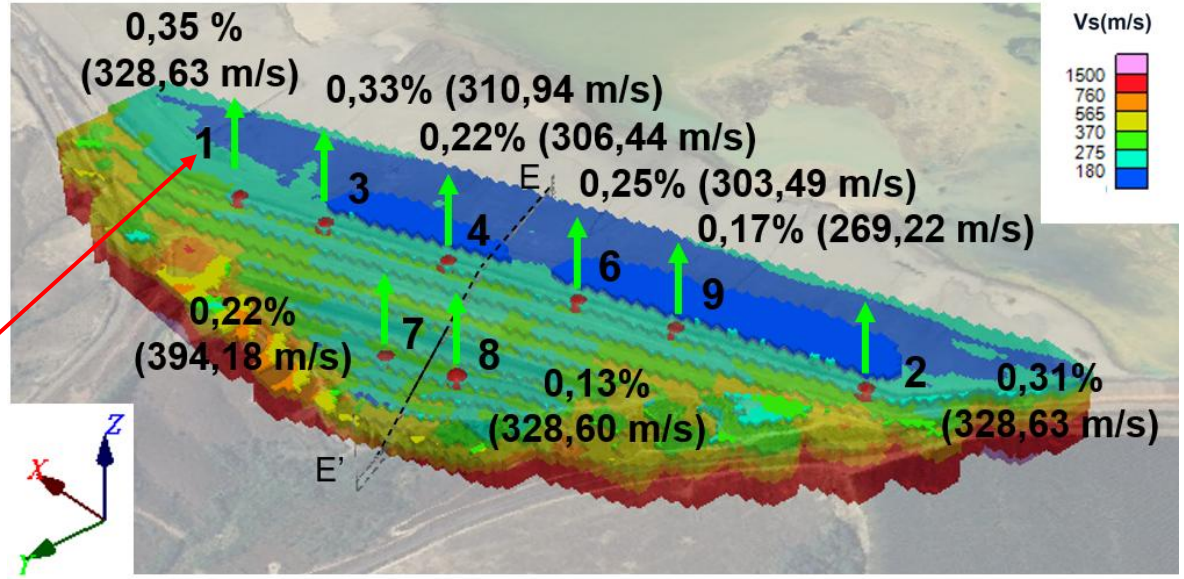
Resultados

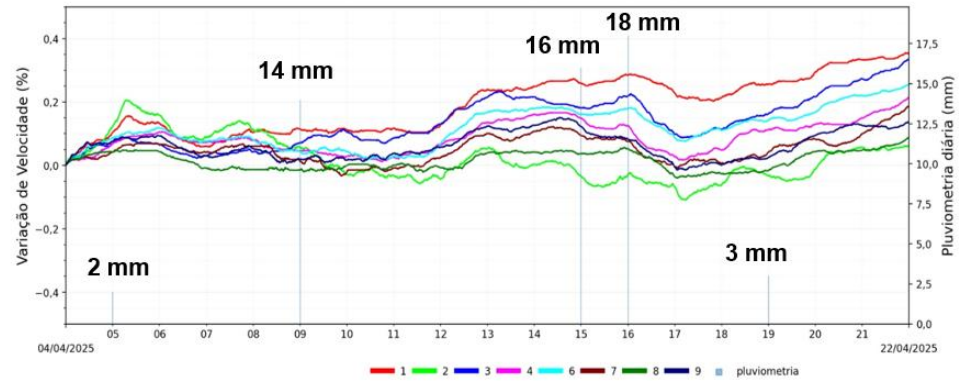
PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Abril 04/04/25 – 22/04/25

Geofone	Valor final (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
1	0,35	0	0,35
2	0,31	-0,11	0,21
3	0,33	0	0,33
4	0,22	0	0,22
6	0,25	0	0,25
9	0,17	-0,01	0,15
7	0,22	-0,03	0,19
8	0,13	-0,04	0,09

Geofone	Vs_T0 (m/s)		Abril		
	0-30m	30-60m	Variação	Vs_Abril 0-30m	Vs_Abril 30-60m
1	327,49	481	0,0035	328,63	482,68
2	305,33	602	0,0031	306,27	603,86
3	309,92	435,2	0,0033	310,94	436,63
4	305,77	441,1	0,0022	306,44	442,07
9	268,77	493,9	0,0017	269,22	440,64
6	302,74	424,9	0,0025	303,49	425,96
7	393,32	596,9	0,0022	394,18	598,21
8	328,18	557,6	0,0013	328,60	558,32



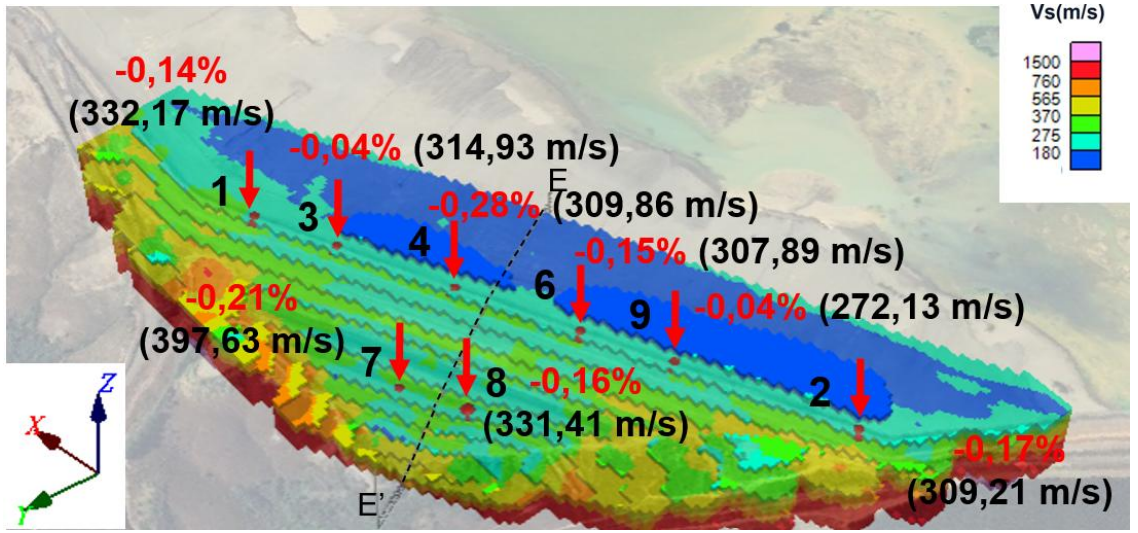


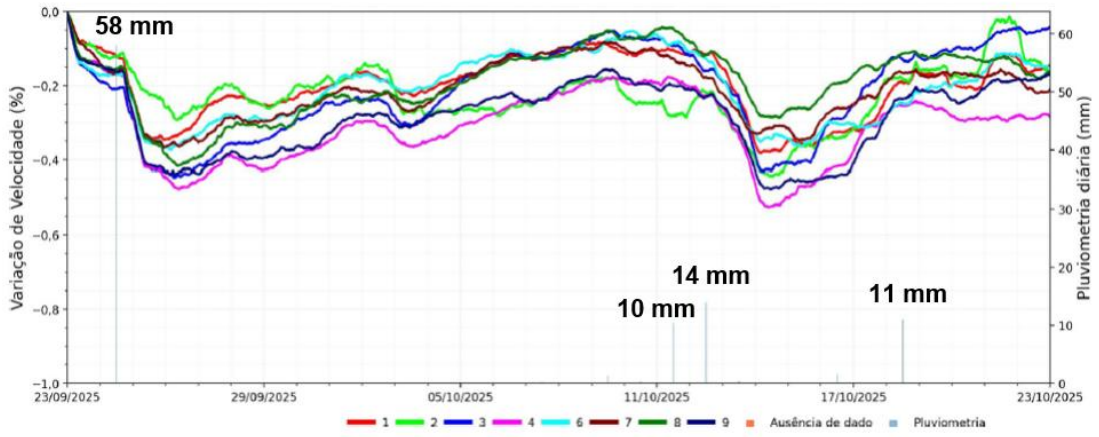
Resultados

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Outubro 23/09/25 - 22/10/25

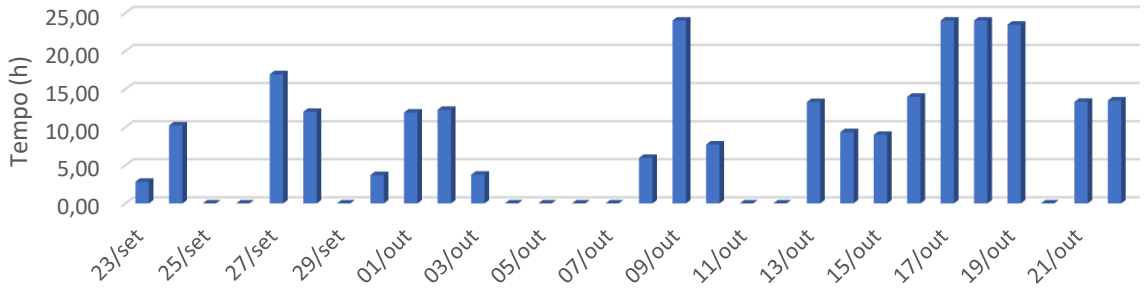
Geofone	Vs_T0 = Setembro (m/s)		Outubro		
			Variação	Vs_Outubro	
	0-30m	30-60m		0-30m	30-60m
1	332,64	488,59	-0,0014	332,17	487,91
2	309,74	606,94	-0,0017	309,21	605,91
3	315,06	442,96	-0,0004	314,93	442,78
4	310,73	448,29	-0,0028	309,86	447,03
9	272,60	446,22	-0,0017	272,13	445,46
6	308,36	432,82	-0,0015	307,89	432,17
7	398,47	604,75	-0,0021	397,63	603,48
8	331,95	564,02	-0,0016	331,41	563,12





Espigotamento

Volume (m³): 52.168

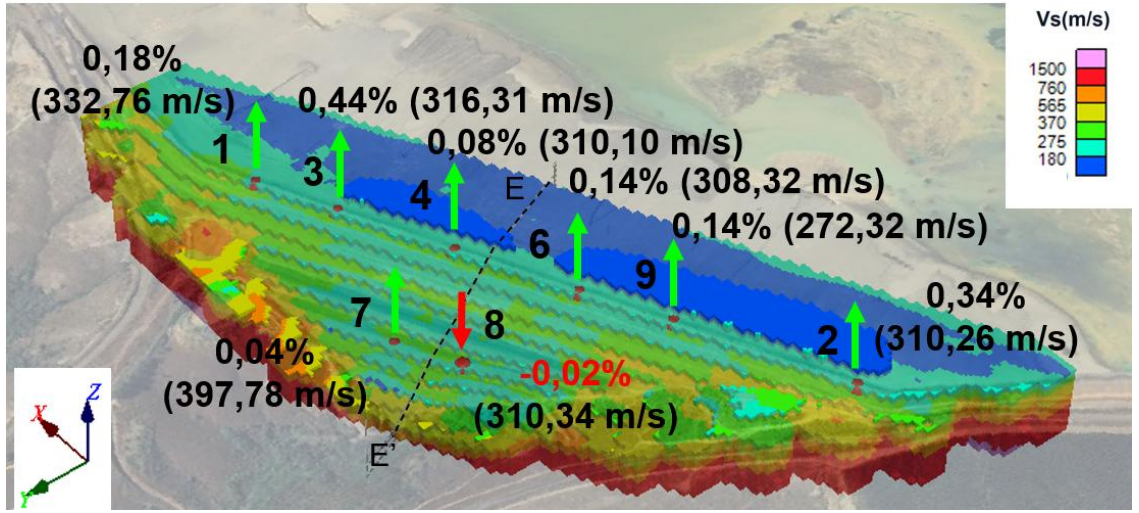


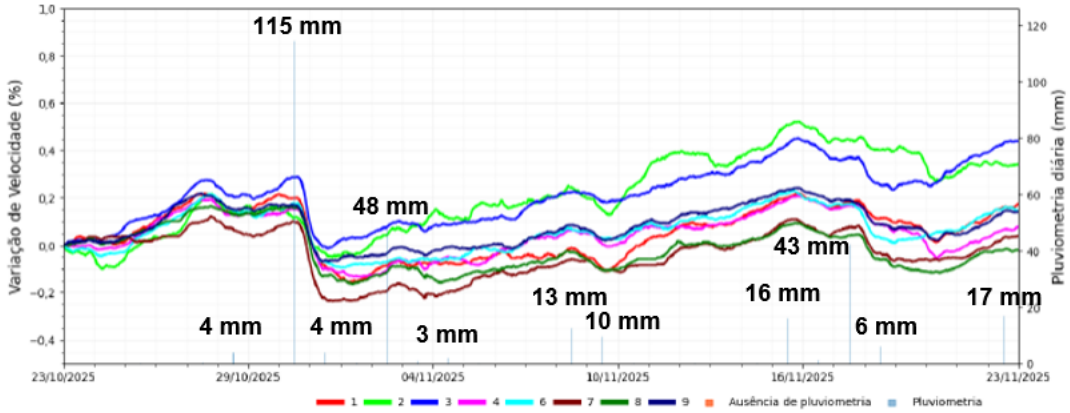
Resultados

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

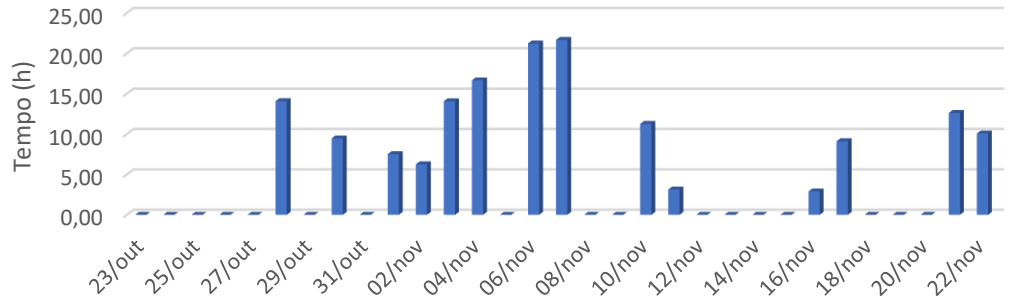
Novembro 23/10/25 - 22/11/25

Geofone	Vs_T0 = Outubro (m/s)		Novembro		
			Variação	Vs_Novembro	
	0-30m	30-60m		0-30m	30-60m
1	332,17	487,91	0,0018	332,76	488,79
2	309,21	605,91	0,0034	310,26	607,97
3	314,93	442,78	0,0044	316,31	444,73
4	309,86	447,03	0,0008	310,10	447,39
9	272,13	445,46	0,0014	272,51	446,08
6	307,89	432,17	0,0014	308,32	432,78
7	397,63	603,48	0,0004	397,78	603,72
8	331,41	563,12	-0,0002	331,34	563,01





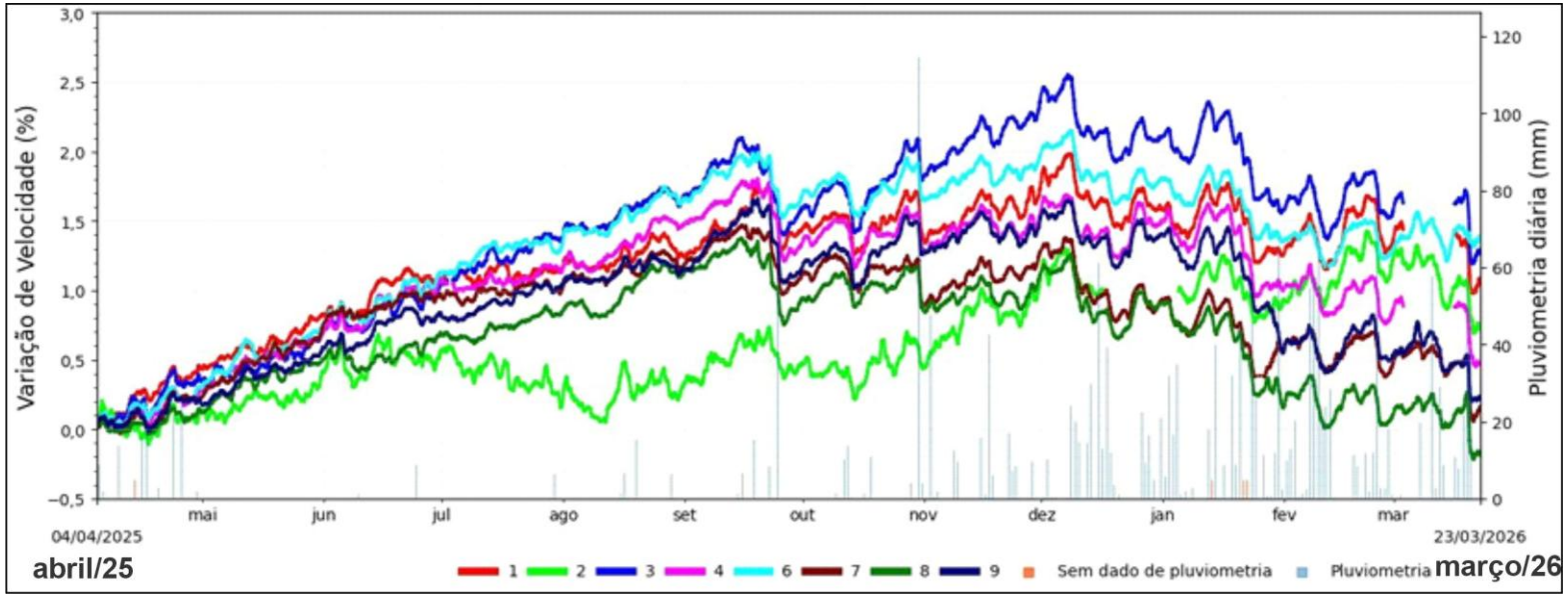
Espigotamento **Volume (m³): 67.383**



Resultados

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Evolução temporal da variação relativa da velocidade das ondas de cisalhamento (dV/v) registrada pelos geofones (abril 2025 – março 2026).



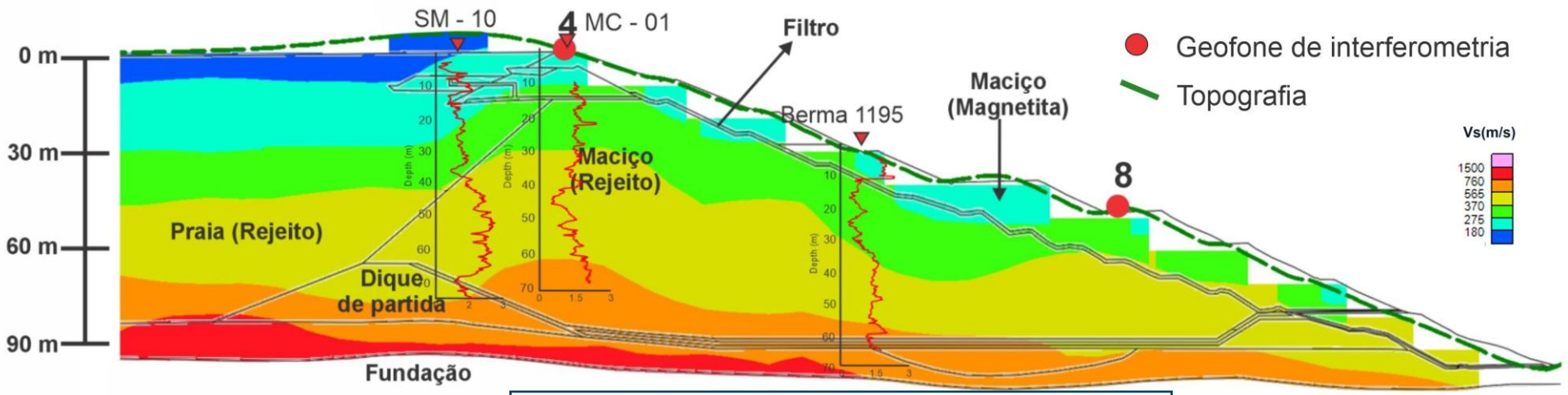
Geofone	Vs inicial (abril/25)		Variação	Vs final (março/26)	
	0-30m	30-60m		0-30m	30-60m
1	327,4	481	0,0107	330,9	486,1
2	305,3	602	0,0074	307,5	606,4
3	309,9	435,2	0,0127	313,8	440,7
4	305,7	441,1	0,0048	307,2	443,2
9	268,7	493,9	0,0022	269,3	494,9
6	302,7	424,9	0,0138	306,9	430,7
7	393,3	596,9	0,0016	393,9	597,8
8	328,1	557,6	-0,0019	327,5	556,5

$$G_0 = \rho \, . Vs^2$$

Resultados

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Seção E–E', integrando o modelo de Vs com os perfis de densidade (HDGS).



Classificação dos terrenos segundo a velocidade média das ondas de cisalhamento, para os 30 m superiores do terreno ($\mathbf{Vs_{30}}$).

Vs30 - ABNT NBR 15421 (ABNT 2023)

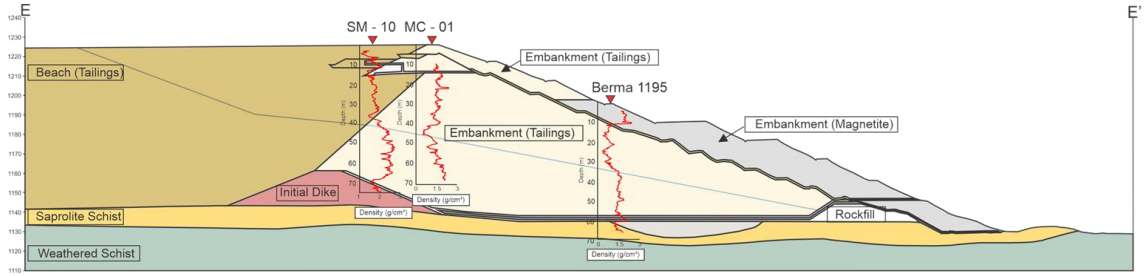
Classe	Tipo de solo	Vs (m/s)
A	Rocha sã	≥ 1.500
B	Rocha	760 – 1.500
C	Rocha alterada ou solo muito rígido	370 – 760
D	Solo rígido	180 – 370
E	Solo mole	≤ 180

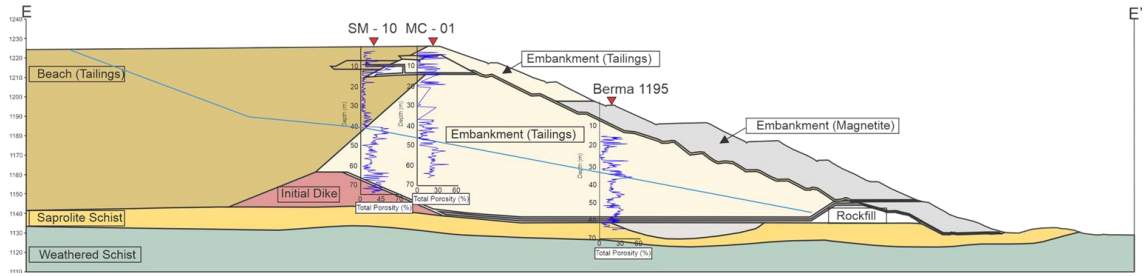
$$G_0 = \rho \, . Vs^2$$

Resultados

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Síntese dos resultados obtidos pelos métodos HDGS e NMR.



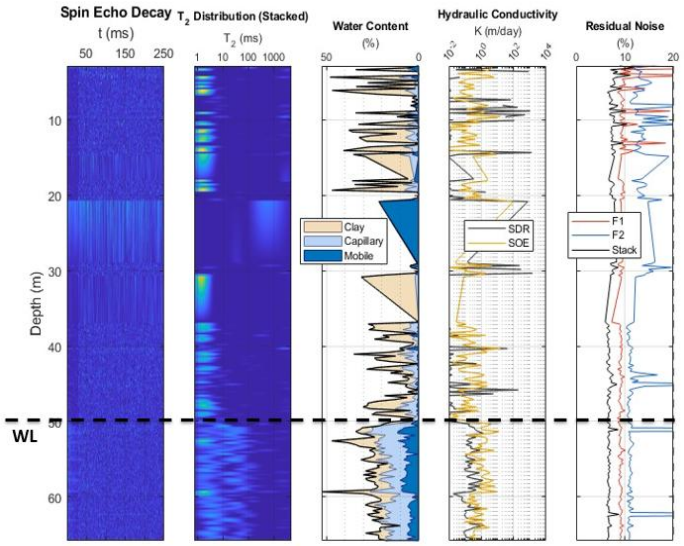


Furo	Localização	NA (m)	Densidade (g/cm³)	Porosidade (%)	Unidades identificadas
SM-10	Praia	~41	1,67–2,55	20–53	Praia de rejeitos, maciço e dique de partida
MC-01	Crista	~50	1,17–2,50	2–45	Maciço (rejeito) e filtro
Berma 1195	Berma	~34	1,37–2,65	22–45	Maciço (magnetita), maciço (rejeito) e fundação

HDGS: interferência na medição ocorre quando o revestimento (PVC) do furo perde contato com o material da barragem, resultando em picos de densidade baixa não representativos.

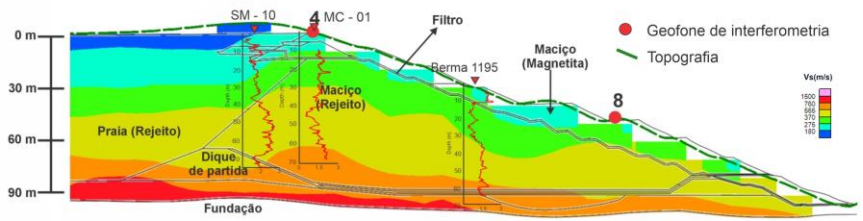
NMR: medições podem ser influenciadas pela presença de magnetita, particularmente nos furos "MC-1" e "Berma 1195".





Estudo pioneiro da Mosaic, CPGA-UFRJ e 3GEO integrando HDGS e NMR em barragens. **Resultados PRELIMINARES em fase de análise.**

Resultados

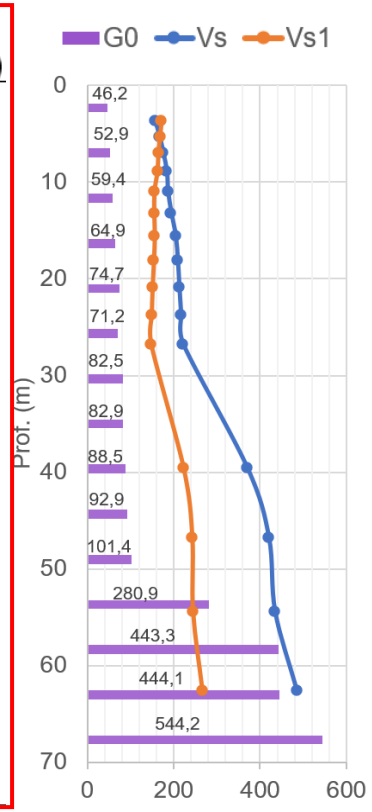


PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Parâmetros derivados para avaliação geotécnica.

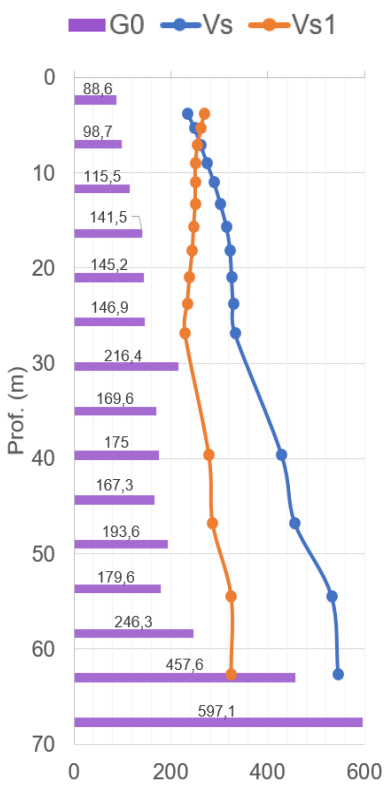
SM-10 PRAIA

Prof. (m)	VS (m/s)	Vs1 (m/s)	G0 (MPa)
3,7	156,1	171,9	46,2
5,2	166,8	168,1	52,9
7,0	175,2	164,3	59,4
8,9	183,6	162,1	64,9
10,9	186,2	155,1	74,7
13,1	193,8	154,3	71,2
15,5	204,1	155,8	82,5
18,1	209,0	153,7	82,9
20,8	212,4	150,8	88,5
23,7	216,5	148,8	92,9
26,7	221,7	147,6	101,4
39,5	370,2	222,8	280,9
46,7	419,9	243,0	443,3
54,4	434,2	244,7	444,1
62,5	484,9	266,5	544,2



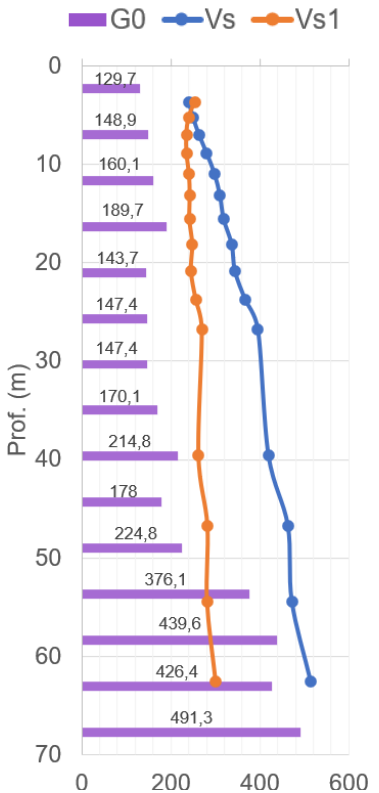
MC-01 CRISTA

VS (m/s)	Vs1 (m/s)	G0 (MPa)
234,1	268,2	88,6
249,2	261,9	98,7
261,3	254,9	115,5
274,5	250,2	141,5
289,2	249,8	145,2
302	249,6	146,9
314,7	246,7	216,4
322,5	244,0	169,6
325,4	238,1	175,0
328,3	233,3	167,3
331,9	228,7	193,6
428,6	278,0	179,6
455,9	285,8	246,3
531,8	324,1	457,6
545,3	323,8	597,1



Berma 1195

VS (m/s)	Vs1 (m/s)	G0 (MPa)
240,1	253,2	129,7
249,4	239,7	148,9
262,7	235,1	160,1
280,2	235,5	189,7
297,7	241,0	143,7
310,0	242,8	147,4
318,3	241,9	147,4
336,4	248,3	170,1
343,8	245,5	214,8
366,8	256,0	178,0
395,7	269,6	224,8
419,5	262,2	376,1
463,4	282,1	439,6
472,2	281,2	426,4
514,9	300,4	491,3



Conclusão

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

RESULTADOS ALCANÇADOS

- ✓ Três furos investigados por HDGS/NMR, com cerca de 215 m de perfilagem de densidade e 201 m de NMR.
- ✓ Modelo 3D com investigação de aproximadamente 90m, gerado a partir de mais de 44mil pontos de Vs.
- ✓ Integração de densidade, porosidade, Vs, Vs_1, G_0 e dV/V, reunindo diferentes propriedades físicas da estrutura.

APRENDIZADOS

- ✓ Nenhum método isoladamente fornece todas as informações necessárias.
- ✓ A integração de métodos com diferentes escalas e sensibilidades permite relacionar a estrutura interna ao seu comportamento ao longo do tempo.

DIFERENCIAL

- ✓ Integração de perfilagem de furos + sísmica de superfície + monitoramento sísmico permanente em uma mesma estratégia.
- ✓ Combinação de caracterização espacial + monitoramento temporal.

LEGADO E PRÓXIMOS PASSOS

- ✓ Continuidade do monitoramento temporal e integração progressiva com os demais dados de instrumentação.
- ✓ Metodologia não invasiva, complementar e com potencial de replicação em outras estruturas de mineração.

OBRIGADO!

Mosaic
ewerton.rodrigues@mosaicco.com
pedro.leite@mosaicco.com
igor.gama2@mosaicco.com

CPGA-UFRJ
marcobraga@geologia.ufrj.br
jp@geologia.ufrj.br

ibram.org.br

IBRAM | 50 ANOS
MINERAÇÃO DO BRASIL

Mosaic®

CPG
Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada