

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Uso de Ensaio Geofísico de Sísmica de Refração para Sondagens Inconclusivas em Projetos de Fundação

George Drozczak

Engenheiro Civil, Blumenau-SC, Brasil, georgedrozczak@gmail.com

Hudson Valverde

Engenheiro Civil, Florianópolis-SC, Brasil, amnis.eng@gmail.com

RESUMO: O objetivo deste artigo é apresentar a importância dos ensaios geofísicos no auxílio de investigações geotécnicas para elaboração de projetos de fundação. Além de trazer um estudo de caso de uma obra industrial realizada no sul do estado de Santa Catarina, na cidade de Nova Veneza. Foram identificadas inconformidades na sondagem SPT em relação ao perfil de solo encontrado, já na fase de execução de fundações diretas (sapatas), e após consultoria geotécnica de fundações, optou-se pela utilização de ensaios geofísicos, de sísmica de refração, a fim de verificar a estratigrafia do perfil do solo.

Inicialmente o projeto de fundações foi elaborado seguindo somente os resultados obtidos nas sondagens SPT, e após a realização da sondagem geofísica, todo o projeto pôde ser revisado e otimizado, gerando uma economia substancial para os donos da obra.

Neste estudo de caso, serão apresentados os resultados do ensaio de sísmica de refração e as medidas adotadas na execução das fundações da obra, após análise de tais resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio geofísico, sísmica de refração, investigações geotécnicas, fundações.

ABSTRACT: The objective of this article is to present the importance of geophysical tests in the aid of geotechnical investigations for the elaboration of foundation projects. In addition to bringing a case study of an industrial work carried out in the south of the state of Santa Catarina, in the city of Nova Veneza. Nonconformities were identified in the SPT sounding in relation to the soil profile found, already in the execution phase of direct foundations (footings), and after geotechnical consultancy of foundations, it was decided to use geophysical tests, of refraction seismic, in order to check the stratigraphy of the soil profile.

Initially, the foundation project was prepared following only the results obtained in the SPT surveys, and after the geophysical survey was carried out, the entire project could be revised and optimized, generating substantial savings for the owners of the work.

In this case study, the results of the seismic refraction test and the measures adopted in the execution of the foundations of the work will be presented, after analysis of such results.

1 Introdução

Nos dias atuais, com a aceleração do mercado da construção civil diante do cenário pandêmico, e com a intensa corrida para otimizar o cronograma das obras, é notável um grande número de falhas de investigações geotécnicas, e tais acontecimentos podem gerar graves patologias ou inconformidades de projeto. Tal fato tende a onerar as obras e gerar relações conflitantes entre projetistas, executores e proprietários dos empreendimentos.

Este estudo de caso pretende apresentar os resultados obtidos, utilizando-se a sísmica de refração, em uma obra industrial realizada no sul do estado de Santa Catarina, na cidade de Nova Veneza. Inicialmente as fundações diretas(sapatas) foram dimensionadas considerando-se somente os resultados de sondagem SPT, entretanto no início da execução das fundações, foram encontradas divergências em relação ao resultado da sondagem SPT e o material encontrado nas escavações das fundações.



Como a obra era industrial e necessitava de uma solução ágil, em virtude do lucro cessante, a empresa dona da obra contratou uma consultoria geotécnica que indicou a utilização de ensaios sísmicos de refração.

Muito embora no Brasil ainda não exista instrução normativa da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) para ensaios geofísicos através de sísmica de refração, um dos poucos documentos normatizados disponíveis é o DNER-ME 045/95 – Prospecção geofísica pelo método de sísmica de refração, uma norma rodoviária que foi elaborada pelo antigo DNER e atual DNIT, de modo geral é uma normativa pontual para trabalhos rodoviários, deste modo há certa dificuldade em argumentar o seu uso de forma comercial para auxílio nos trabalhos de investigações geotécnicas para fundações, contudo estudos recentes como de Gandolfo & De Souza (2021), onde os autores elaboraram um manual de boas práticas e procedimentos para a execução de ensaios geofísicos no Brasil, justificam a importância do seu uso.

2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar a importância da utilização de ensaios geofísicos de forma qualitativa no auxílio da elaboração de projetos geotécnicos de fundação. Muitas vezes os solos investigados e analisados apresentam certa complexidade e grande variabilidade de profundidades do perfil geotécnico. Este trabalho irá mostrar as falhas de investigações geotécnicas preliminares relacionados com as características da geologia local, determinando as possíveis soluções de elementos de fundação para executar a obra.

3 Estudo de Caso

3.1 Características da obra

A obra está localizada no sul do estado de Santa Catarina, na cidade de Nova Veneza. Uma obra industrial com mais de 14.000,00 m² (quatorze mil metros quadrados) de construção, e o terreno da obra possui aproximadamente 50.000,00 m² (cinquenta mil metros quadrados).

O conjunto estrutural da obra é composto por 180 pilares com carga de até 100 tf. e inicialmente foram realizadas somente sondagens SPT. Foram realizados 25 furos de sondagem SPT na região onde a obra foi executada. Dos 25 furos apenas um furo chegou ao impenetrável com 6 metros de profundidade do nível 0,00 metros do terreno, os demais 24 furos variaram entre 1,95 e 3,80 metros de profundidade



Figura 1. Localização Cidade Nova Veneza-SC. Fonte: Wikipedia



3.2 Geologia



Figura 2. Localização Geológica Nova Veneza-SC. Fonte: CPRM

Tabela 1. Estratigrafia do Sul do Estado de Santa Catarina. Fonte: CPRM

PERÍODO	COLUNA ESTRATIGRÁFICA		
	GRUPOS	FORMAÇÕES	MEMBROS
QUATERNÁRIO (RECENTES)		SEDIMENTOS	
		CONTINENTAIS MARINHOS	
JURÁSSICO CRETÁCEO (180 - 120 MA)		SERRA GERAL	
		BOTUCATU	
PERMIANO SUPERIOR (250 - 225 MA)		RIO DO RASTRO	MORRO ALTO
			SERRINHA
		TEREZINA	
		SERRA ALTA	
		IRATI	ASSITÊNCIA TAQUARAL
PERMIANO INFERIOR (270 - 270 MA)	GUATÁ	PALERMO	
		RIO BONITO	SIDERÓPOLIS PARAGUAÇU TRIUNFO
		ITARARÉ	
		RIO DO SUL	
PRÉ CAMBRIANO	GRANITÓIDES		

A área de estudo analisada neste trabalho está localizada no topo da formação Irati (Membro assistência). Caracterizada por folhelhos pretos provinientes de resto do réptil Mesossauros brasiliensses que atua de São Paulo e passa pelos três estados do sul do Braisl, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.



Sua ocorrência é em estreita faixa contínua, vinda do norte até a altura de São Bento Baixo, na cidade de Nova Veneza-SC, e se amplia pelo efeito da intrusão de diabásio e desaparece para o recoberto com sedimentos do Cenozóico.

Em Santa Catarina, a formação costuma ser subdividida em dois Membros: Taquaral e Assistência (Mühlmann et al., 1974).

Membro Taquaral consiste de siltitos e folhelhos cinza-escuros, eventualmente cinza-claros e azulados, com desagregação conchoidal, sendo que a espessura raramente é superior a 20 metros. Segundo Mühlmann et al. (1974) as características litológicas e sedimentares desta unidade são indicativas de ambiente marinho de águas calmas, abaixo do nível de ação das ondas.

A designação Membro Assistência é empregada para o pacote de folhelhos cinza-escuro que intercala, em geral, duas camadas de folhelhos pretos, pirobetuminosos, associados a horizontes de calcários creme e cinza-escuro, dolomíticos, silicificados em superfície, sendo característica em Santa Catarina a formação de nódulos de sílex. Em diversas regiões do estado é comum a interestratificação de leitos de folhelho pirobetuminoso com calcário, caracterizando uma ritmicidade das condições ambientais. Seu conteúdo fóssilífero compreende os répteis *Mesosaurus brasiliensis* e *Stereosternum tumidum*, restos de vegetais, de peixes e de crustáceos, além de palinomorfos. À semelhança do Membro Taquaral, sua gênese é tida como marinha de águas rasas, com os folhelhos pirobetuminosos sedimentados em ambiente de restrição, enquanto os calcários, em áreas de plataforma (Mühlmann et al., 1974), na região, a espessura do pacote do siltito da Formação Irati fica na casa de 50 m.

3.3 Investigações geotécnicas

4.3.1 Sondagem SPT

Tabela 2. Sondagem SPT

Furo	NA	Camada (m)	Golpes		Material
			Iniciais	Finais	
SP-01	-1,60	-1,00	5	8	Aterro
		-1,95	10/0	-	Argila Cons. Média
SP-02	-1,50	-1,00	6	7	Aterro
		-1,60	10/0	-	Argila Cons. Média
SP-03	-1,70	-1,00	5	7	Aterro
		-2,00	15	22	Argila Média
		-2,65	10/0	-	Argila Cons. Dura
SP-04	-1,50	-1,00	4	5	Aterro
		-2,00	17	20	Argila Média
		-2,85	10/0	-	Argila Cons. Dura
SP-05	-1,70	-1,00	3	7	Aterro
		-2,00	18	23	Argila Média
		-2,65	10/0	-	Argila Cons. Dura
SP-06	-1,30	-1,00	5	8	Aterro
		-2,00	22	25	Argila Média
		-2,70	10/0	-	Argila Cons. Dura
SP-07	-1,50	-1,60	7	8	Aterro
			10/0	-	Argila Cons. Média



SP-08	-2,10	-1,00	5	7	Aterro
		-2,30	17	10/0	Argila Cons. Dura
SP-09	-3,00	-1,00	3	4	Aterro
		-2,00	8	10	Argila Média
		-3,30	28	10/0	Argila Cons. Dura
SP-10	-3,50	-1,00	4	7	Aterro
		-2,00	10	9	Argila Média
		-3,00	11	12	Argila Média
		-3,80	10/0	-	Argila Cons. Dura
SP-11	-5,10	-1,00	3	4	Aterro
		-2,00	5	6	Argila Média
		-3,00	5	8	Argila Média
		-4,00	7	9	Argila Média
		-5,00	16	22	Argila Média
		-6,00	20/10		Argila Cons. Dura
SP-12	-2,20	-1,00	4	5	Aterro
		-2,00	17	21	Argila Média
		-2,80	10/0	-	Argila Cons. Dura
SP-13		-1,00	6	8	Aterro
		-1,90	10/0	-	Argila Dura
SP-14	-3,05	-1,00	3	5	Aterro
		-2,00	19	25	Argila Média
		-3,18	20/18	10/0	Argila Cons. Dura

3.3.2 Caso

Já com o projeto estrutural desenvolvido, baseado somente nas sondagens SPT realizadas no terreno preliminarmente, foram iniciadas as obras de execução das fundações diretas. Uma vez realizadas as escavações, constatou-se que o solo de apoio das fundações, em análise tátil visual, não oferecia suporte, nem resistência mecânica, para o apoio das mesmas. E tendo em vista a importância e porte da obra em questão, os serviços de fundação foram imediatamente paralisados, até que uma análise mais criteriosa fosse realizada.

Em virtude dos 14 mil metros quadrados de obra, as sondagens complementares tradicionais, como a sondagem rotativa, mostrou-se demasiadamente onerosa e incapaz de cobrir tal área com informações suficientes para entendimento global do subsolo.

Desta forma a consultoria geotécnica, sugeriu a aplicação da sondagem sísmica de refração. Que além de trazer informações precisas da estratigrafia do solo, seria capaz de cobrir uma grande área, através das linhas sísmicas, sem que seu custo aumentasse na mesma proporção. Somente dois furos de sondagem rotativa foram solicitados para que se pudesse comparar com os resultados sísmicos. Além de dois pontos de sondagem elétrica.



3.3.2 Sondagem Rotativa

3.3.2.1 - SR01:

- 0,0 – 2,6m – Aterro
- 2,6 – 3,5m – Siltito cinza alterado
- 3,5 – 5,1m – Siltito cinza parcialmente alterado
- 6,5 – 9,5m – Siltito cinza preservado.

3.3.2 Ensaio Geofísico Sísmica de Refração

O método é realizado estabelecendo-se a geração de ondas sísmicas por meio de uma fonte externa de impacto (shot), como uma marreta, ao longo de uma linha de levantamento onde os geofones, que captam as velocidades das ondas sísmicas, estão posicionados. As ondas geradas se propagam pelo meio e, quando há uma diferença abrupta nas propriedades elásticas, parte da energia é refletida e parte é refratada.

A velocidade de propagação é obtida através da relação do tempo de chegada e da distância percorrida pela onda refratada, que são registrados pelos geofones. A partir das velocidades de propagação, admitindo-se que a velocidade aumente com a profundidade, é possível determinar a profundidade das interfaces identificadas no levantamento.

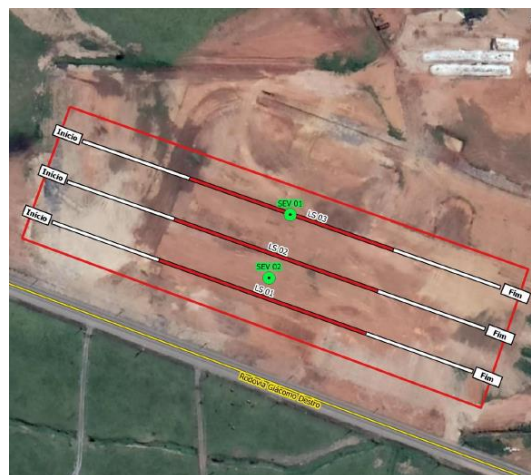


Figura 3. Locação linhas sísmicas – Mapa Google

O resultado (distribuição das velocidades de ondas sísmicas compressoriais calculadas a partir da tomografia sísmica) e a interpretação (velocidades de ondas sísmicas relacionadas com a composição das camadas do subsolo) dos 03 perfis sísmicos são apresentados a seguir. A escolha dos intervalos para o parâmetro físico foi realizada com base nos dados sísmicos obtidos em campo, dados de eletrorresistividade, dados de SPT e no conhecimento geológico-estratigráfico local.

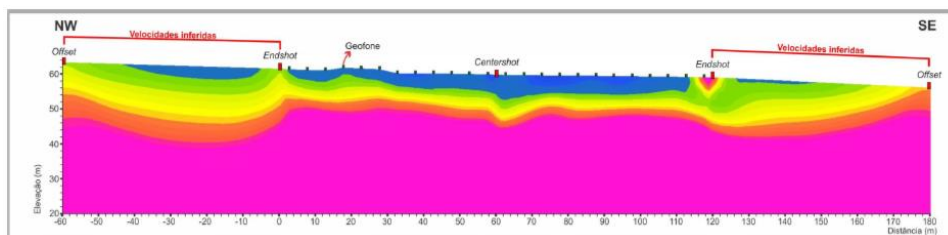


Figura 4. Perfil Sísmico 01 – Distribuição das velocidades

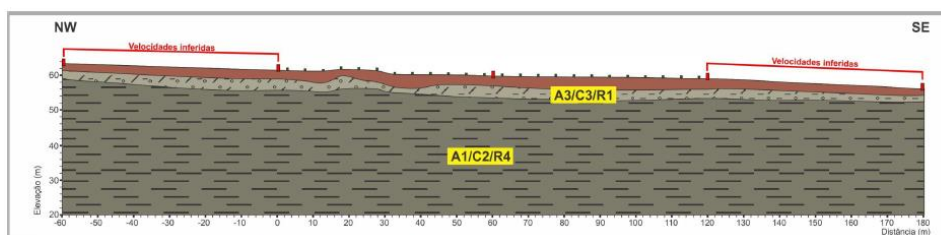


Figura 5. Perfil Sísmico 01 Interpretado

É válido ressaltar que as velocidades obtidas no início e no fim dos perfis sísmicos, regiões correspondentes aos *shots* 1 e 5, denominados de *offsets*, basearam-se em dados interpolados durante o processamento.

A primeira camada que ocorre nos perfis sísmicos está relacionada com o solo residual sedimentar ou aterro (solo argilo-siltoso) e apresenta uma espessura aproximada que varia entre 2,00 a 4,00 m. Abaixo dos horizontes de solo ocorre uma camada de rocha alterada, que apresenta uma espessura média aproximada de 2,00 m. Essa camada é pouco resistente e coerente, porém, guarda a estrutura da rocha sedimentar e, por esse motivo, não tem comportamento de solo.

A rocha sã (intercalação de folhelho, siltitos e argilitos) é formada por camadas sub-horizontais que por estarem compactadas em profundidade são rochas moderadamente coerentes e resistentes (50,00 ~ 100,00 MPa).

4 Análises e Conclusões

1. A espessura dos horizontes de solo varia, aproximadamente, entre 2,00 a 4,00 m. Ocorre um aumento da espessura em direção a região sudeste da área de estudo;

2. Abaixo dos horizontes de solo, ocorre uma camada, com aproximadamente 2,00 m de espessura, de rocha alterada. Trata-se de uma camada constituída por um litotipo alterado, pouco coerente e resistente (1,00 ~ 5,00 MPa);

3. O topo rochoso (rocha sã) é constituído por intercalações de folhelhos, pelitos e siltitos da Fm. Irati. Tratam-se de camadas que apresentam diferentes estruturas, texturas e composições e, portanto, diferentes resistências. Por estarem compactadas em profundidade, assumiu-se que são rochas moderadamente coerentes e resistentes (50,00 ~ 100,00 MPa). Assim sendo, podem ser utilizadas para ancoragem das fundações;

4. Considerando os resultados obtidos, sugerimos as partes envolvidas que 80% das fundações pré-estabelecidas como diretas eram insatisfatórias para o seu uso.



5. Os resultados obtidos através da sísmica de refração foram extremamente satisfatórios, e a análise conjunta das sondagens sísmicas, elétricas e rotativas trouxeram subsídios suficientes para a definição de uma solução eficaz, segura e econômica para a obra.

6. O uso da sondagem sísmica de refração, além de trazer informações claras acerca da estratigrafia do solo, gerou grande economia para os donos da obra. Com a sua utilização, e o sucesso nos seus resultados foi possível a economia de 60% no custo de uma nova campanha de sondagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROWN, E. T. 1981. **Rock Characterization Testing & Monitoring - ISRM Suggested Methods**. Pergamon Press, Oxford, 211p.

COSTA, E. da C. 2015. **Fácies sedimentares e composição de folhelhos da Formação Irati (Eopermiano) da Bacia do Paraná na região de Bom Retiro, leste de Santa Catarina**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2004. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, EMBRAPA Solos, n° 46. Rio de Janeiro – RJ.

GUIDICINI, G.; SANTOS OLIVEIRA, A. M.; PIRES DE CAMARGO, F.; KAJI, N. 1972. Um método de classificação geotécnica preliminar de meios rochosos. **Semana Paulista de Geologia Aplicada**, 4, Anais. São Paulo, p. 275 – 282.

HACHIRO, J. 1996. **O subgrupo Irati (Neopermiano) da Bacia do Paraná**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 196p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2006. **Mapa de Unidades de Relevo do Brasil**. 1:5.000.000. Diretoria de Geociências.

MILANI, E. J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. **Tese de doutorado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G., SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A. e FRANÇA, A. B. 2007. Bacia do Paraná. In: **Cartas Estratigráficas**. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13441**: Rochas e solos. Simbologia. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA: Ensaio de Permeabilidade em Solos – Boletim 4. São Paulo, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA: Manual de Sondagens – Boletim 3, 4ª Edição. São Paulo, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Solos – Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2020