

INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA E GEOFÍSICA NA FUNDAÇÃO DE EDIFÍCIO NA ORLA DE FORTALEZA (CE)

Antonio Marrano¹; Otávio Coaracy Brasil Gandolfo²; Adriano Marchioreto³; Márcio dos Santos⁴; Leandro Alves Ramos⁵

Resumo – Foi realizada uma investigação geológico-geotécnica e geofísica para o reforço de fundação de um edifício atualmente em construção na orla de Fortaleza, na qual foi possível alcançar as rochas do embasamento subjacentes aos sedimentos arenoargilosos e o arenito pouco consolidado da Formação Barreiras. Foram reconhecidas as seguintes unidades estratigráficas, em ordem crescente de profundidade: Conglomerado Arenítico Laterizado, Solo de Alteração de Rocha e Gabro / Metacalcário. Foi possível reconhecer a interface entre as rochas sedimentares e as ígneas/metamórficas e seus respectivos derivados. Foram executados ensaios sísmicos *crosshole* para a determinação da velocidade de propagação da onda de cisalhamento (V_s), que é relevante para a engenharia de fundações, uma vez que este parâmetro está diretamente relacionado à rigidez (G_0) *in situ* do material. São apresentados os valores (mínimos e máximos) de V_s obtidos em cada unidade estratigráfica. São apresentadas oportunidades de melhoria para futuros programas de investigação geológico-geotécnica voltados à fundação de edifícios de grande porte.

Abstract – A geological-geotechnical and geophysical investigation was carried out for the reinforcement of the foundation of a building currently under construction on the Fortaleza seafront, in which it was possible to reach the basement rocks underlying the sandy clayey sediments and the poorly consolidated sandstone of the Barreiras Formation. The following stratigraphic units were recognized, in descending order of depth: Laterized Sandstone Conglomerate, Weathered Rock Soil and Gabbro/Metalimestone. It was possible to recognize the interface between sedimentary and igneous/metamorphic rocks and their respective derivatives. Crosshole seismic tests were performed to determine the shear wave propagation velocity (V_s), which is relevant for foundation engineering, since this parameter is directly related to the stiffness (G_0) *in situ* of the material. The values (minimum and maximum) of V_s obtained in each stratigraphic unit are presented. Opportunities for improvement are also presented.

Palavras-Chave – Investigação geológico-geotécnica; sondagem mista; fundação; gabro; metacalcário; ensaio sísmico *crosshole*; empreendimento Dona Cotinha – DC360; Fortaleza; Ceará

¹ Geólogo, MSc, a serviço da Fundsolo Serviços Geotécnicos e Fundações Ltda., marrano.antonio@gmail.com

² Geofísico, PhD, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, gandolfo@ipt.br

³ Geofísico, PhD, Alta Resolução Geofísica e Geologia, adriano@altaresolucao.com.br

⁴ Engenheiro Civil, Fundsolo Serviços Geotécnicos e Fundações Ltda., marcio@fundsolo.com.br

⁵ Engenheiro Civil, MSc, Normatel Incorporações, leandro.ramos@normatel.com.br

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o registro de uma investigação geológico-geotécnica e geofísica na qual foi possível alcançar as rochas do embasamento subjacentes aos sedimentos arenoargilosos e o arenito pouco consolidado da Formação Barreiras, que normalmente servem de fundação para os edifícios situados na orla de Fortaleza (CE).

O Empreendimento Dona Cotinha - DC360, edifício residencial atualmente em construção pela empresa Normatel Incorporações, está situado na Avenida Beira-Mar, no bairro Meireles, em Fortaleza (CE). Seu projeto de fundação foi elaborado pelo escritório do Eng. Luciano Décourt, apoiado em resultados de investigações geológico-geotécnicas e de ensaios geofísicos *crosshole* realizados em 2021, que identificaram o horizonte reconhecido como adequado ao assentamento do Bloco de Concreto Armado de Fundação.

Entretanto, durante o período construtivo, constatou-se a ocorrência de recalques inesperados sob a carga de cerca de 50% das lajes do edifício, que resultaram na necessidade de se projetar o reforço de fundação para se obter a esperada estabilização. Tal reforço, desenvolvido pelo mesmo projetista, envolveu a execução de 42 estacas raiz profundas ($\phi = 400$ mm) a partir do topo do Bloco de Concreto Armado de Fundação, associado a um programa de 13 sondagens mistas e de novos ensaios geofísicos *crosshole*, de modo a avançar no conhecimento geológico da fundação em questão. As estacas raiz e as sondagens mistas foram executadas pela empresa Fundsolo Serviços Geotécnicos e Fundações Ltda., enquanto que os ensaios geofísicos foram realizados pela empresa Alta Resolução Geofísica e Geologia e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. Esses trabalhos foram desenvolvidos em 2024.

Como já citado, este artigo abordará apenas os aspectos geológico-geotécnicos e geofísicos resultantes das investigações realizadas. A concepção do projeto de reforço de fundação, a execução das estacas raiz, bem como a trajetória de estabilização dos recalques não serão objeto deste trabalho.

2. SOBRE O PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

2.1. Processo executivo

A **Figura 1** apresenta a planta de locação das sondagens executadas para apoiar o projeto de reforço de fundação. As 13 sondagens mistas do programa foram executadas a partir do 4º subsolo (cota = -11,40 m) do edifício atualmente em construção, sendo que algumas delas foram realizadas a partir do topo do Bloco de Concreto Armado de Fundação (cota = -13,80 m). Em ambos os casos, a referência de nível adotada no projeto (RN = 0,00 m) é a Avenida Beira-Mar.

O Bloco de Concreto Armado de Fundação é uma estrutura de formato retangular, com 19,0 m de largura máxima, 13,27 m de largura mínima e 1,60 m de altura, apoiado sobre uma base de 0,20 m de concreto de regularização.

A execução das sondagens seguiu os procedimentos preconizados no Manual de Sondagens da ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE, 2021a).

As sondagens mistas foram executadas com diâmetro HW (~4") por meio de sonda rotativa hidráulica modelo MACH 700, com a realização de ensaios SPT nos trechos em solo ou de baixa resistência, avançando sobre o maciço rochoso até completar a profundidade máxima de 30 m, que corresponde, aproximadamente, à cota -44 m. No total, o programa de investigação computou cerca de 331 m perfurados nesta fundação. Ressalta-se que a exiguidade do espaço destinado à execução das sondagens (no 4º subsolo, com pé direito de 2,85 m de altura) condicionou demasiadamente a produtividade deste programa de investigação. Como consequência, obteve-se um valor médio de 5,71 m perfurados por dia, por vezes com a utilização de dois equipamentos e dois turnos de trabalho.

Por fim, os testemunhos foram fotografados em suas respectivas caixas de sondagem, com boa resolução, de modo a permitir o adequado registro para eventuais consultas futuras.

Ressalta-se que a determinação do nível d'água nas sondagens ficou prejudicada em função do rebaixamento do lençol freático aplicado nesta fase construtiva do edifício.

Destaca-se, ainda, que todas as sondagens executadas, ademais de suas respectivas finalidades específicas, contribuíram para o melhor conhecimento do maciço de fundação do empreendimento em questão.

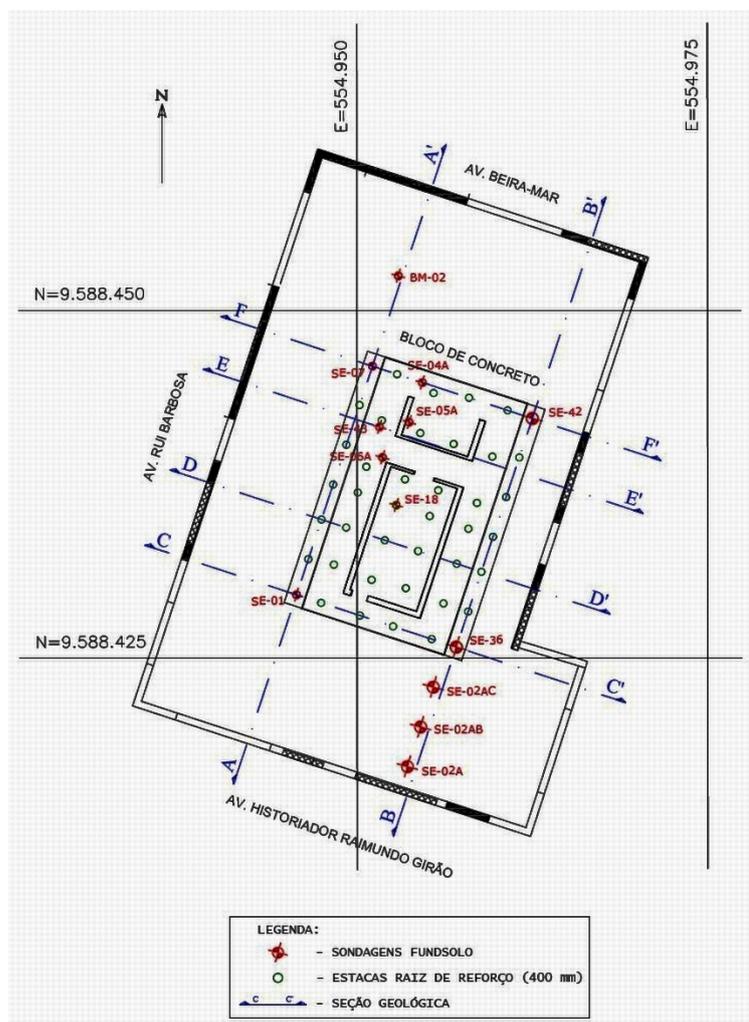


Figura 1 - Planta de localização da investigação geológico-geotécnica

2.2. Parâmetros geológico-geotécnicos

A descrição das sondagens tomou como base a publicação Diretrizes para Descrição de Sondagens - 2ª Tentativa (ABGE, 2021b).

Para o trecho em solo, a descrição foi feita a partir da avaliação tátil-visual, considerando a sua origem e as possíveis unidades geológicas, com base num perfil de intemperismo, segundo dois principais conjuntos: solos transportados (aluvião, terraço fluvial, coluvião, tálus, sedimento marinho, entre outros) e solos formados *in situ* (solo de alteração/residual).

Assim, os solos foram descritos conforme os seguintes atributos: granulometria predominante e secundária (areia siltosa ou argilosa; silte arenoso ou argiloso; argila arenosa ou siltosa); cor; presença de horizontes limonizados / laterizados. Adicionalmente, para os horizontes de solo de alteração, também foi observada a ocorrência de vestígios ou mesmo a presença de estrutura reliquiar ou arranjo mineral associado à rocha matriz.

Para o trecho em rocha, foram feitas considerações de acordo com os seguintes atributos: cor; litologia; condição das descontinuidades naturais: fraturas abertas/fechadas; com superfícies lisas, rugosas/ásperas ou estriadas; limpas ou com preenchimento; com/sem alteração; e inclinação. Ainda para o trecho em rocha, foram utilizados os seguintes parâmetros geotécnicos: recuperação por manobra; grau de alteração; grau de coerência; grau de fraturamento e RQD (*Rock Quality Designation*), conforme resumidamente apresentado na **Tabela 1** e na **Tabela 2**.

Tabela 1 - Graus de alteração e de coerência

Grau de Alteração		Grau de Coerência	
A1 -	Praticamente sã	C1 -	Coerente
A2 -	Medianamente alterada	C2 -	Medianamente coerente
A3 -	Alterada	C3 -	Pouco coerente
A4 -	Muito a extremamente alterada	C4 -	Incoerente

Tabela 2 - Grau de fraturamento e RQD

Grau de Fraturamento (número de fraturas / metro)			RQD (%)		
F1 -	≤ 1	(Ocasionalmente fraturado)	Q1 -	100 - 90	(Excelente)
F2 -	2 - 5	(Pouco fraturado)	Q2 -	89 - 75	(Bom)
F3 -	6 - 10	(Medianamente fraturado)	Q3 -	74 - 50	(Regular)
F4 -	11 - 19	(Muito fraturado)	Q4 -	49 - 25	(Pobre)
F5 -	≥ 20	(Extremamente fraturado)	Q5 -	≤ 24	(Muito pobre)

Menciona-se, ainda, que em trechos com recuperação inferior a 75%, a determinação do RQD não foi efetuada pois poderia conduzir a resultados contraditórios.

2.3. Unidades estratigráficas

A análise das sondagens e seus respectivos perfis individuais permitiu estabelecer a seguinte sequência estratigráfica a partir da fundação do Bloco de Concreto:

a) **Conglomerado Arenítico Laterizado**: apresenta espessura remanescente pós escavação variando entre 1,40 m e 6,70 m. É constituído, predominantemente, de blocos submétricos de arenito silicificado extremamente resistente, cinza avermelhado, envolvidos em argila arenosa cinza clara a amarelada / esbranquiçada, por vezes com manchas vermelhas associadas à ocorrência de concreções lateríticas ($\phi \sim 1$ cm a 3 cm), além de grãos angulosos de quartzo ($\phi \sim 1$ cm a 4 cm) e, eventualmente, com brecha arenosa. Nas sondagens, os blocos de arenito apresentaram comprimentos de até 60 cm. Entende-se que tais blocos tenham dimensões variadas, com ocorrência espacialmente errática e, portanto, podem não estar adequadamente representados nas sondagens executadas. O processo de silicificação do arenito e de laterização desta unidade se reflete nos valores de SPT, sempre altos ($N_{SPT} > 30$) e próximos ao impenetrável. Nos trechos de ocorrência de arenito silicificado, foi utilizado o método rotativo com coroa de vídia para o avanço da perfuração. Considera-se que esta unidade esteja relacionada ao processo geológico que culminou com a deposição dos sedimentos da Formação Barreiras, de idade Terciária. A **Figura 2** e **Figura 3** ilustram aspectos desta unidade;

b) **Solo de Alteração**: apresenta espessura variando entre 6,00 m e 15,61 m e é constituído, essencialmente, de argila siltosa, com intercalações de silte argiloso. No seu terço superior, a cor prevalente é a cinza clara com intensas manchas de cor marrom avermelhada escura, com concreções ferruginosas. À medida que se avança em profundidade, a cor predominante passa a ser a cinza esverdeada. Nessa unidade, é possível reconhecer vestígios da estrutura original da rocha matriz, sobretudo pelo arranjo mineral, ainda que os minerais estejam intensamente alterados e, por vezes, mostrando indícios de orientação preferencial (**Figura 4a** e **Figura 5a**). À medida que se aproxima do contato solo-rocha, a alteração dos minerais torna-se menos proeminente e o arranjo mineral se aproxima daquele encontrado na rocha subjacente. Os valores de SPT foram superiores a 15 golpes ($N_{SPT} > 15$) e, geralmente, apresentam-se crescentes com a profundidade, até atingir o impenetrável no contato solo-rocha. Entretanto, é possível encontrar horizontes com N_{SPT} mais elevados, próximos do impenetrável, intercalados com outros nos quais os valores de N_{SPT} são da ordem de 15-25 golpes. Entende-se que essas variações de resistência estejam relacionadas a níveis com diferentes graus de intemperismo dentro dessa unidade;



Figura 2 - Aspecto da unidade Conglomerado Arenítico Laterizado. Notar, na coluna da direita, o bloco de arenito silicificado (L~60 cm).



Figura 3 - Presença de brecha arenosa na unidade Conglomerado Arenítico Laterizado

c) **Rocha:** inicialmente, se mostrava, do ponto de vista macroscópico, de difícil definição do tipo litológico. Por esta razão, foram coletadas duas distintas amostras para a execução de análises por microscopia petrográfica. As amostras foram encaminhadas ao Departamento de Mineralogia e Geotectônica do Instituto de Geociências (IGc) da Universidade de São Paulo, que resultou na identificação de dois tipos litológicos:

- **gabro:** de maior ocorrência na fundação; trata-se de uma rocha ígnea intrusiva, maciça, cor cinza escura, constituída essencialmente de plagioclásio (30%), piroxênio (40%) e olivina (5%). Secundariamente, ocorre clorita (20%) e traços de carbonato, quartzo e serpentina (**Figura 4b**);
- **metacalcário:** trata-se de uma rocha metassedimentar, maciça, cor cinza clara, sem estrutura visível, microcristalina, de difícil identificação mineralógica, mesmo ao microscópio. Sua matriz é constituída essencialmente de carbonato (80%) e quartzo (15%-20%), com vestígios de carapaças de gastrópodes e de conchas (**Figura 5b**).



(a)



(b)

Figura 4 - (a) Solo de Alteração de Gabro. Notar como o arranjo mineral da rocha matriz se encontra preservado; (b) Gabro, em trecho de rocha praticamente sã (A1). Amostras de testemunhos de sondagem



Figura 5 - (a) Solo de Alteração de Metacalcário. Notar como a estrutura microcristalina da rocha matriz se encontra preservada; **(b)** Metacalcário, em trecho de rocha praticamente sã (A1). Amostras de testemunhos de sondagem

A natureza intrusiva do gabro no horizonte de metacalcário ocasionou a ocorrência de intercalações de ambos os tipos litológicos. Assim, em algumas sondagens, verificou-se a predominância do gabro, enquanto que em outras, o gabro encontrava-se ora sobreposto e ora sotoposto ao horizonte de metacalcário.

As sondagens mostram que esses tipos litológicos se apresentam, em geral, com recuperação superior a 60%, alcançando facilmente os 100%. Entretanto, na porção superior, com cerca de 3 m de espessura, próximo ao topo rochoso, a recuperação pode ser significativamente baixa, entre 0% e 30%, com parâmetros geotécnicos mais desfavoráveis: graus de alteração A4-A3 (muito / extremamente alterada a alterada), graus de coerência C4-C3 (incoerente a pouco coerente), graus de fraturamento F5-F4 (extremamente a muito fraturado) e valores de RQD entre 70% e 30%, podendo ainda alcançar valor nulo (0%). Abaixo desse horizonte rochoso inicial, os parâmetros geotécnicos melhoram significativamente: grau de alteração A1 (rocha praticamente sã), grau de coerência C1 (rocha coerente), graus de fraturamento F3-F2 (medianamente a pouco fraturado) e valores de RQD entre 70% e 100%.

Levando em consideração a consulta bibliográfica efetuada para subsidiar a compreensão da geologia do Ceará (BRANDÃO, 1995; CPRM, 2014; LINS, 2016), considera-se que essas litologias (gabro e metacalcário) estejam possivelmente associadas à Unidade Canindé, parte integrante do Complexo Ceará, do período Proterozoico. O Complexo Ceará é interpretado como uma sequência de margem passiva associada à abertura de um oceano, ocorrida em torno de 850 milhões de anos (LINS, 2016).

2.4. Seções geológico-geotécnicas

Para subsidiar a interpretação do arranjo espacial das unidades estratigráficas, foram elaboradas seis seções geológico-geotécnicas, conforme mostrado na planta de locação anteriormente apresentada na **Figura 1**. A **Figura 6** apresenta uma das seções longitudinais e a **Figura 7** apresenta uma das seções transversais.

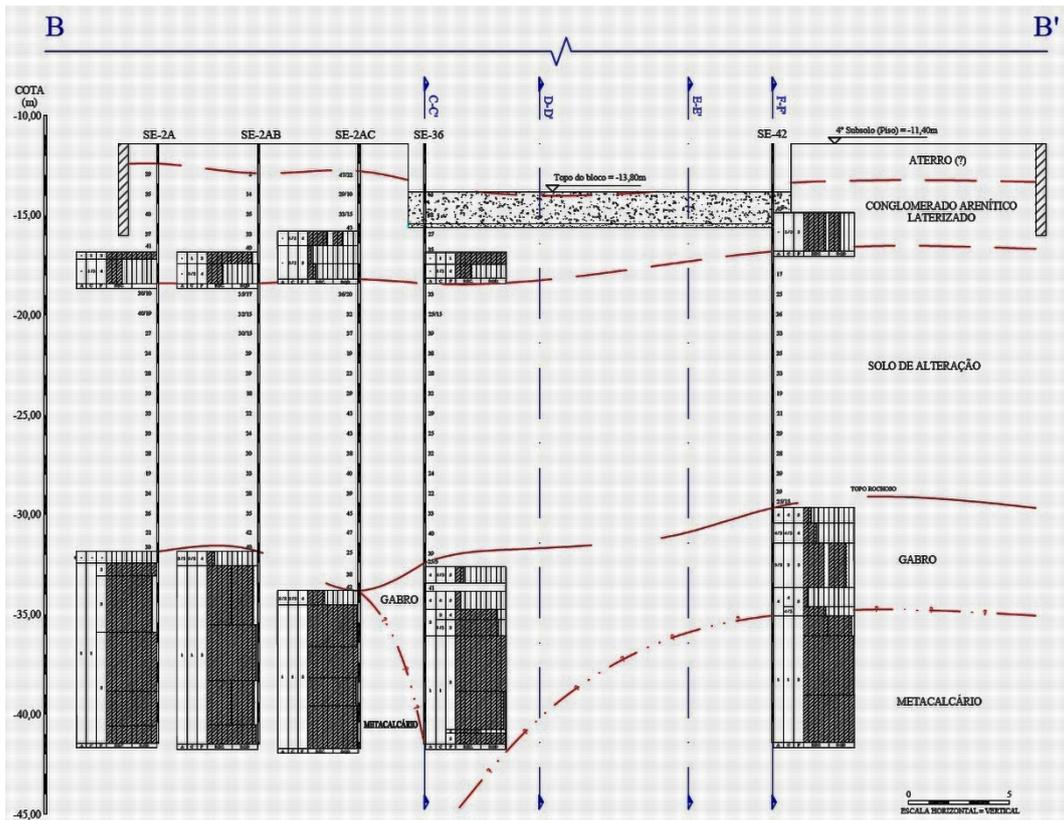


Figura 6 - Seção geológico-geotécnica longitudinal BB'. Para localização, ver Figura 1.

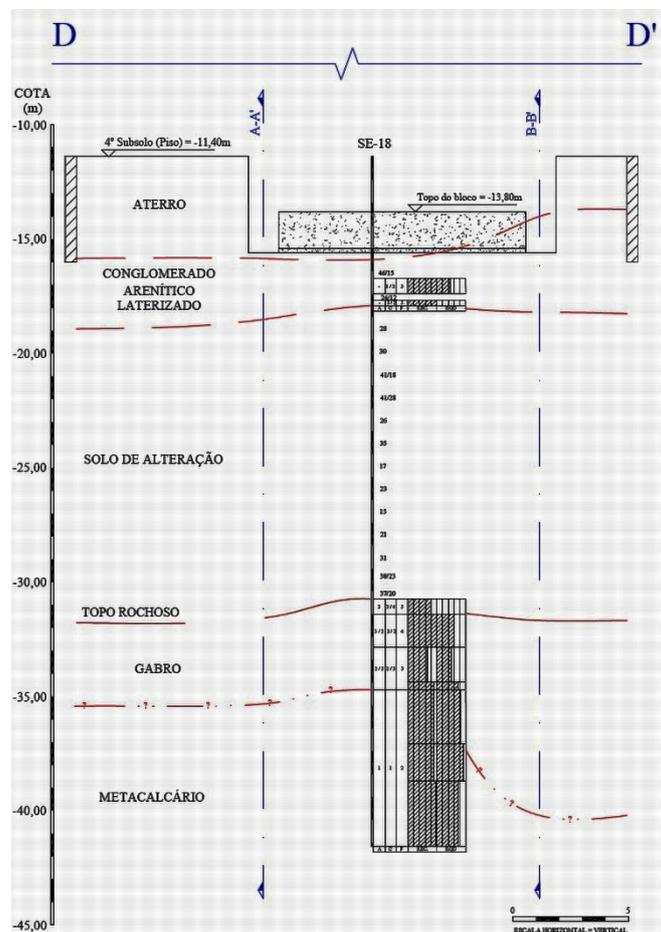


Figura 7 - Seção geológico-geotécnica transversal DD'. Para localização, ver Figura 1.

Verifica-se que as unidades geológicas naturais reconhecidas na fundação do Empreendimento DC360 podem ser separadas em dois grandes grupos, de acordo como sua gênese:

- a) rochas sedimentares e derivados (conglomerado arenítico laterizado);
- b) rochas ígneas / metamórficas e derivados: gabro, metacalcário e seus respectivos solos de alteração.

Assim, constata-se que a interface entre as rochas sedimentares e as ígneas/metamórficas encontra-se em torno da cota -18 m, enquanto que o topo rochoso situa-se cerca da cota -31,5 m. Como referência, tem-se que a base do Bloco de Concreto Armado de Fundação está situada na cota -15,60bm, ou seja, sua fundação está assentada no Conglomerado Arenítico Laterizado.

Ressalta-se ainda que esta configuração da fundação do Empreendimento DC360 somente foi reconhecida a partir da investigação adicional, realizada para subsidiar o projeto do reforço de fundação, uma vez que as investigações iniciais, anteriores, tal como programadas, não alcançaram o horizonte do Solo de Alteração abaixo do Conglomerado Arenítico Laterizado.

3. SOBRE O PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA

3.1. Seleção do método

O método geofísico utilizado na investigação foi o ensaio sísmico *crosshole* (Figura 8). Por ser um ensaio que fornece resultados quantitativos e com uma boa resolução em profundidade (pelo fato de ser realizado em furos de sondagens), possui grande aceitação e credibilidade por parte dos engenheiros civis/geotécnicos.

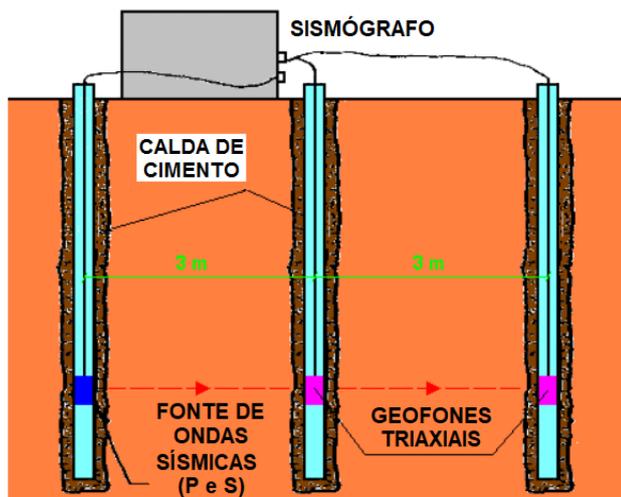


Figura 8 – Arranjo do ensaio sísmico *crosshole* (SOUZA e GANDOLFO, 2021)

O ensaio *crosshole* determina a velocidade de propagação das ondas sísmicas de compressão (ondas P) e de cisalhamento (ondas S) nos maciços terrosos e rochosos com uma resolução vertical da ordem de 1 m e é de grande utilidade para a engenharia de fundações.

As ondas sísmicas causam pequenas deformações no terreno ao se propagarem e, desta forma, permitem a avaliação dos maciços em seu estado *in situ*, sendo preservadas as suas condições naturais de confinamento, consolidação e umidade.

O conhecimento da velocidade de propagação da onda de cisalhamento (V_s) é de relevância para a engenharia de fundações, uma vez que este parâmetro está diretamente relacionado à rigidez (G_0) *in situ* do material (de massa específica dada por ρ) por meio do qual as ondas de cisalhamento se propagam, conforme apresentado na **Equação 1** a seguir:

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (\text{Eq. 1}).$$

Por isso, neste trabalho, foram realizadas somente medidas das velocidades de V_s .

3.2. Resultados

A **Figura 9** apresenta os resultados de dois ensaios *crosshole* realizados no ano de 2021, antes da construção do edifício, com as bocas dos furos situadas no nível da Avenida Beira-Mar (RN = 0,00 m).

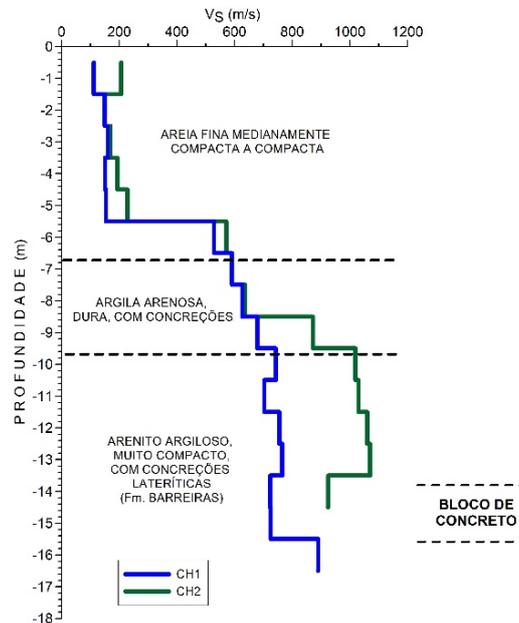


Figura 9 - Resultados dos ensaios *crosshole* realizados em 2021. A descrição dos horizontes está baseada na investigação geológico-geotécnica realizada na ocasião.

A camada superior de areia fina apresentou valores de V_S em torno de 150 m/s a 200 m/s. As velocidades aumentam com a profundidade, atingindo valores entre 700 m/s a 1050 m/s no arenito com concreções lateríticas. Materiais com V_S superiores a 700 m/s podem ser classificados como rocha (POULOS, 2022). Esse arenito é o que comumente serve de fundação para os edifícios na orla de Fortaleza.

Em função desses resultados, o Bloco de Concreto Armado de Fundação foi projetado para ser construído entre as profundidades -13,80 m (topo) e -15,40 m (base), sobre uma camada de 0,20 m de concreto de regularização.

Com o edifício em construção, o Bloco de Concreto ficou posicionado no nível do 4º subsolo. Assim, em 2024, foram realizados três ensaios sísmicos *crosshole*, cuja localização está apresentada na **Figura 10**.

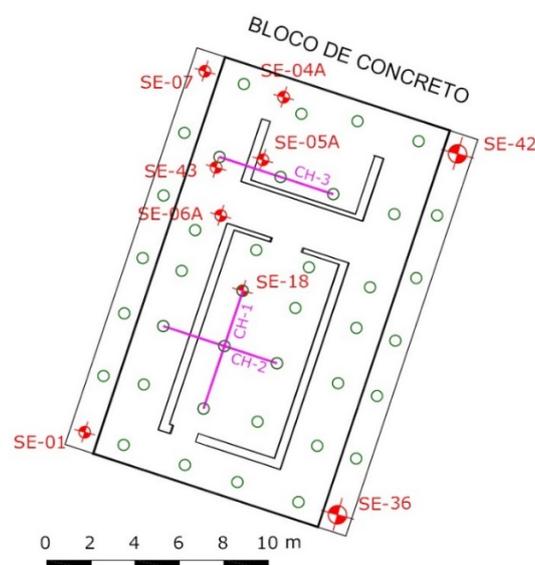


Figura 10 - Localização dos ensaios *crosshole* realizados em 2024 (CH-1, CH-2 e CH-3).

Foi utilizado um sismógrafo modelo *Geode* marca *Geometrics* (USA), dois geofones com mecanismo de fixação na parede do furo por meio de um sistema pneumático, marca PASI e uma fonte mecânica de pequeno diâmetro ($\phi = 40$ mm), constituída por um martelo com um corpo fixo e um batedor corrediço, com mecanismo de fixação por meio de dispositivo pneumático, utilizado para a geração das ondas S (**Figura 11**).



Figura 11 - Equipamento utilizado para os ensaios *crosshole* realizados em 2024: sismógrafo e *notebook* acoplados (esquerda); geofones de furo (centro); fonte sísmica de pequeno diâmetro para geração de ondas de cisalhamento (direita)

Esses três ensaios permitiram investigar maiores profundidades (furos com 30 m), ou seja, abaixo do horizonte anteriormente reconhecido em 2021 como sendo de arenito pouco consolidado da Formação Barreiras, conforme apresentado na **Figura 12**.

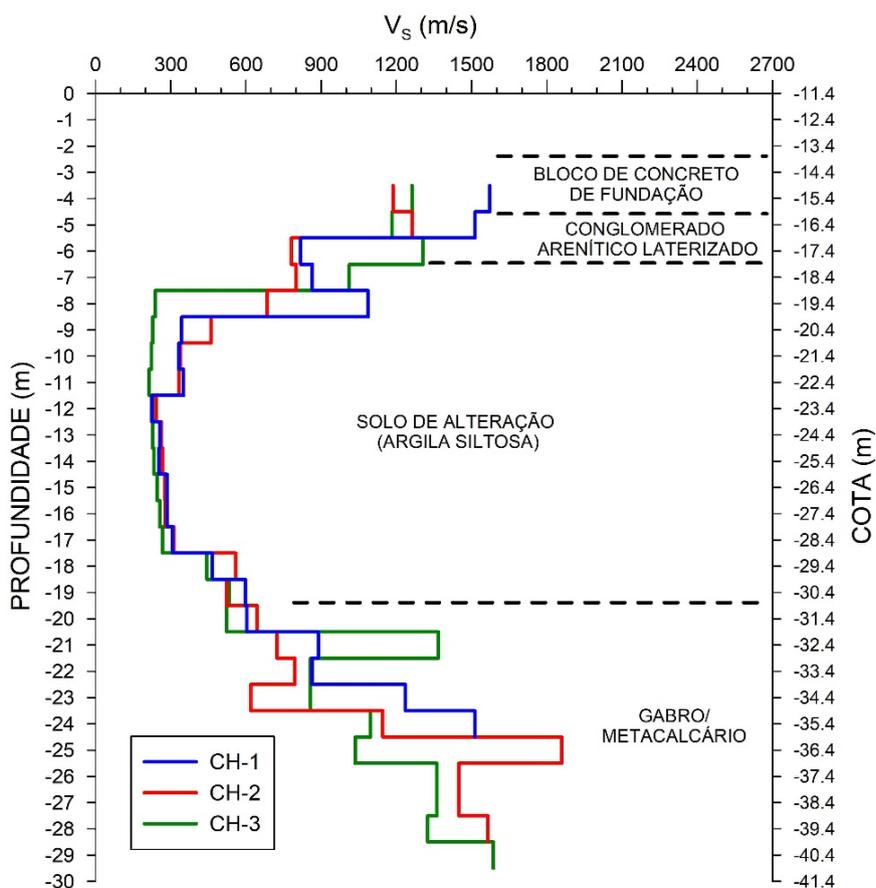


Figura 12 - Resultados dos ensaios *crosshole* realizados em 2024 (CH-1, CH-2 e CH-3). Notar que, para esses ensaios, a referência de nível é o piso do 4º subsolo do edifício (RN = -11,40 m). A descrição dos horizontes está baseada na nova investigação geológico-geotécnica (2024).

Os resultados desses ensaios indicaram que:

- a) o horizonte de Conglomerado Arenítico Laterizado, que serviu de fundação para o Bloco de Concreto, apresentou altos valores de velocidade V_s , situados entre 784 m/s e 1306 m/s;
- b) abaixo do Conglomerado Arenítico Limonitizado, ocorre uma camada com baixos valores de V_s , situados entre 214 m/s e 560 m/s. De acordo com as novas investigações realizadas, esta camada corresponde ao Solo de Alteração de Rocha (argila siltosa com intercalações de silte argiloso);
- c) na rocha subjacente (Gabro / Metacalcário), foram encontrados os maiores valores de V_s :
 - Gabro (alterado, fraturado): V_s entre 620 m/s e 1859 m/s;
 - Gabro (são): V_s entre 1146 m/s e 1859 m/s;
 - Metacalcário (são): V_s entre 1036 m/s e 1587 m/s.

De modo geral, observa-se que os valores de V_s obtidos pelo ensaio sísmico *crosshole* estão compatíveis com aqueles esperados para os diversos tipos de materiais investigados, conforme apresentado na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Típicos valores de V_s para diversos materiais (POULOS, 2022, modificado)

Material	Velocidade da onda S (V_s) em m/s
Solo muito mole	85 - 105
Solo mole	106 - 135
Solo (consistência média)	136 - 185
Solo rígido	186 - 275
Solo muito rígido	276 - 365
Rocha branda / Solo cimentado	366 - 760
Rocha	761 - 1500
Rocha dura	> 1500
Concreto	2286 - 2438

De acordo com a velocidade de propagação das ondas sísmicas, a camada de Solo de Alteração de Rocha (argila siltosa com intercalações de silte argiloso) poderia ser classificada como um solo rígido a muito rígido, até a transição com a rocha subjacente. Já o horizonte correspondente ao Conglomerado Arenítico Laterizado (valores de V_s superiores a 784 m/s), poderia ser classificado como um material rochoso.

4. CONCLUSÕES

Diante do exposto anteriormente, considera-se como aspectos mais relevantes o que segue:

a) A investigação geológico-geotécnica e geofísica realizada em 2024 no Empreendimento Dona Cotinha – DC360, situado na avenida Beira-Mar, no bairro Meireles, em Fortaleza (CE), permitiu alcançar as rochas do embasamento subjacentes aos sedimentos arenoargilosos e o arenito pouco consolidado da Formação Barreiras, que normalmente servem de fundação para os edifícios situados na orla desse município;

b) Esta investigação foi realizada a partir do nível do 4º subsolo do edifício em construção, tanto no entorno como sobre o Bloco de Concreto Armado de Fundação e permitiu reconhecer as seguintes unidades estratigráficas, em ordem crescente de profundidade: Conglomerado Arenítico Laterizado, Solo de Alteração de Rocha e Gabro / Metacalcário, cujas principais características são resumidas a seguir:

- **Conglomerado Arenítico Laterizado:** constituído, predominantemente, de blocos submétricos de arenito silicificado extremamente resistente, cinza avermelhado, envolvidos em argila arenosa cinza clara a amarelada / esbranquiçada, por vezes com manchas vermelhas associadas à ocorrência de concreções lateríticas ($\phi \sim 1$ cm a 3 cm), além de grãos angulosos de quartzo ($\phi \sim 1$ cm a 4 cm) e, eventualmente, com brecha arenosa. É neste horizonte que está assentado o Bloco de Concreto Armado de Fundação. Os ensaios *crosshole* mais recentes indicaram altos valores de V_s , situados entre 784 m/s e 1306 m/s;
- **Solo de Alteração:** constituído, essencialmente, de argila siltosa, com intercalações de silte argiloso, cinza clara com intensas manchas de cor marrom avermelhada escura e concreções ferruginosas, no seu terço superior, passando a cinza esverdeada em profundidade, com vestígios da estrutura reliquiar da rocha matriz. Os ensaios *crosshole* mais recentes indicaram baixos valores de V_s , situados entre 214 m/s e 560 m/s;
- **Rocha:** compreendendo dois tipos litológicos: Gabro (ígnea) e Metacalcário (metamórfica). A natureza intrusiva do Gabro no horizonte de Metacalcário ocasionou a ocorrência de intercalações de ambos os tipos litológicos. Os ensaios *crosshole* mais recentes indicaram os maiores valores de V_s : entre 620 m/s e 1859 m/s para o Gabro alterado e fraturado; entre 1146 m/s e 1587 m/s para o Gabro são e entre 1036 m/s e 1587 m/s para o Metacalcário são;

c) A interface entre as rochas sedimentares e as ígneas/metamórficas e seus respectivos derivados encontra-se em torno da cota -18 m, enquanto que o topo rochoso situa-se aproximadamente na cota -31,5 m. A referência de nível adotada no projeto (RN = 0,00 m) é a Avenida Beira-Mar;

d) Esta configuração da fundação do Empreendimento DC360 somente foi reconhecida a partir da investigação adicional realizada para subsidiar o projeto do reforço de fundação, uma vez que as investigações iniciais, anteriores, tal como programadas, não alcançaram o horizonte do Solo de Alteração abaixo do Conglomerado Arenítico Laterizado.

5. RECOMENDAÇÕES

Como oportunidades de melhoria para futuros programas de investigação geológico-geotécnica voltadas a projetos desta natureza (fundação de edifícios de grande porte), sugere-se:

a) Contemplar a execução de pelo menos uma sondagem mista mais profunda, com profundidade mínima entre 1,5 a 1,6 vezes o comprimento previsto para as demais sondagens do programa, de modo a oferecer ao projetista uma visão mais ampla e segura das características do maciço de fundação. Sob este aspecto, a consulta à documentação bibliográfica porventura existente (mapa geológico, dissertações, teses, entre outros) será de grande valia durante a etapa de planejamento da investigação;

b) Avaliar as características geológico-geotécnicas do maciço natural (terroso ou rochoso) no trecho final de cada sondagem com o intuito de verificar a necessidade (ou não) de se avançar a perfuração. Assim, evita-se que a investigação proposta seja limitada por um critério rígido de paralisação que leva em conta apenas a profundidade previamente definida, substituindo-o por outro que leva em consideração as características do maciço objeto da investigação. Para tanto, é fundamental o acompanhamento, em tempo real, do avanço das perfurações, por meio de um geólogo de engenharia;

c) Utilizar o ensaio sísmico *crosshole* para a determinação do perfil da variação, em profundidade, da velocidade da onda de cisalhamento (V_s), um parâmetro geotécnico / geofísico de referência e de extrema importância para a caracterização dos geomateriais.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL – ABGE. 2021a. Manual de Sondagens. Boletim 3, Edição 6. In: *Investigações geológico-geotécnicas: guia de boas práticas*. São Paulo: ABGE, 2021. Livro 3. p.87-242.
- _____ – ABGE. 2021b. Diretrizes para Descrição de Sondagens – 2ª tentativa. In: *Investigações geológico-geotécnicas: guia de boas práticas*. São Paulo: ABGE, 2021. Livro 6. p.357-442.
- BRANDÃO, R. L. 1995. *Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza – texto explicativo: Projeto SINFOR*. Fortaleza: CPRM, 1995. 46p. Contém 1 mapa. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/8568> (consulta em 11/03/2024).
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. 2014. *Mapa Geológico. Projeto Materiais de Construção Civil na Região Metropolitana de Fortaleza. Mapa de Localização. Base Cartográfica*. Fortaleza: CPRM, 2014. Contém 1 mapa. https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/17059/10/mapa_geologico_rmfortaleza.pdf (consulta em 11/03/2024).
- LINS, J. P. C. 2016. *Mapeamento geológico de parte das unidades Canindé e Independência no distrito de Manoel Pereira, município de Canindé – CE*. Fortaleza, 83p. (Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação, Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências). <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/22264/browse?type=author&order=ASC&rpp=20&value=Lins%2C+J%C3%A9ssica+Patr%C3%ADcia+Capistrano> (consulta em 26/04/2024).
- POULOS, H. G. 2022. *Use of shear wave velocity for foundation design*. Geotechnical and Geological Engineering, v. 40, n. 4, p. 1921-1938.
- SOUZA, L. A. P.; GANDOLFO, O. C. B. 2021. *Geofísica aplicada à geologia de engenharia e meio ambiente: manual de boas práticas*. São Paulo: ABGE, 155p.