

Relatório de Pesquisa IPR RP – 027

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO
PARAMÉTRICO PARA A
REPRESENTAÇÃO DE BOLETINS
DE SONDAGENS SPT EM BIM**

BRASÍLIA/DF
Julho/2026

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA-GERAL
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES

Relatório de Pesquisa IPR RP – 027

IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO PARAMÉTRICO PARA A REPRESENTAÇÃO DE BOLETINS DE SONDAGENS SPT EM BIM

Elaboração: Universidade Federal de Viçosa

Contrato: TED 00703/2020

Processo: SEI nº 50600.017752/2026-66

DOI: 10.70859/IPR-RP-027/2026

Brasília/DF

Julho/2026

EQUIPE TÉCNICA:

Eng.º Kléos Magalhães Lenz Cesar JR, Ph.D. – Universidade Federal de Viçosa – UFV

Eng.^a Camila Mendes Souza – Universidade Federal de Viçosa – UFV

Eng.º José Carlos Lopes Ribeiro, D.Sc.– Universidade Federal de Viçosa – UFV

Eng.º Diôgo Silva de Oliveira, D.Sc.– Universidade Federal de Viçosa – UFV

Eng.º José Maria Franco de Carvalho, D.Sc.– Universidade Federal de Viçosa – UFV

REVISÃO DE EDITORAÇÃO:

Eng.º Galileu Silva Santos – IPR/DPP/DNIT

Eng.^a Simoneli Fernandes Mendonça – IPR/DPP/DNIT

Eng.º Marcos Felipe Veverka Faria – Consórcio Progen/HPT

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria-geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas em Transportes.

Implementação de modelo paramétrico para a representação de boletins de sondagens SPT em BIM – Brasília/DF, 2026.

82 p. (Relatório de Pesquisa – IPR RP 027)

O conteúdo apresentado neste documento é de inteira responsabilidade dos autores.

A reprodução completa ou parcial desta publicação é permitida, sem alterar seu conteúdo, desde que não tenha fim comercial e que seja citada a referência bibliográfica completa.

RESUMO

O planejamento das fundações de uma construção normalmente é iniciado pela investigação do subsolo por meio de diferentes tipos de sondagem. Dentre eles, o *Standard Penetration Test* (SPT, sondagem a percussão) é o mais comum em obras brasileiras. O resultado deste ensaio em campo é conhecido como boletim de sondagem (BS), usualmente apresentado em planilhas eletrônicas, que permitem a visualização ilustrativa do interior do furo de sondagem, mostrando as diferentes camadas do solo, o nível d'água e o índice de resistência a penetração (NSPT). A análise preliminar do boletim de sondagem acontece pela associação da camada do solo com seus respectivos NSPT, de forma que a tensão admissível do solo pode ser estimada por meio deste índice. No âmbito de projetos de engenharia, as ferramentas tecnológicas evoluíram de desenhos em CAD (*Computer-Aided Design*), cuja base de dados é formada basicamente por linhas, para modelos BIM (*Building Information Modeling*), um universo virtual que representa a realidade modelada por parâmetros descritivos dos objetos constituintes do modelo, possibilitando a colaboração de diferentes ramos da engenharia (hidráulica, estrutural, elétrica, etc.) em um mesmo ambiente de projeto. Há pouca inserção da geotecnia em BIM em relação às demais áreas, quanto à concepção de modelos virtuais. Portanto, visando implementar aspectos geotécnicos à modelagem BIM, propõe-se a elaboração de um modelo paramétrico do boletim de sondagem. Para isso, os dados do BS foram organizados e classificados em uma tabela, para que pudessem ser inseridos e interpretados no software Autodesk *Revit*. A leitura, modelagem visual e interpolação de dados foi feita por programação visual. O objetivo foi alcançado, resultando no modelo paramétrico em BIM e nos códigos em programação visual, possibilitando a análise e aplicação no processo de modelagem estrutural.

Palavras-chave: Dynamo; Sondagem a percussão (SPT); Modelagem da informação da construção (BIM); DNIT.

ABSTRACT

The planning of a building's foundations usually begins with subsurface investigation through different types of drilling. Among them, the Standard Penetration Test (SPT) is the most common in Brazilian construction projects. The result of that field test is known as the Borehole Report (BS), usually presented in spreadsheets which allow for illustrative visualization of a borehole's interior, showing the different soil layers, the water level, and the penetration resistance index (NSPT). The preliminary analysis of the BS involves associating the soil layer with its respective NSPT, so that the soil's allowable stress can be estimated based on this index. In the field of engineering projects, technological tools have evolved from CAD (Computer-Aided Design) drawings, whose database is basically composed of lines, to BIM (Building Information Modeling) models, a virtual universe that represents reality modeled by descriptive parameters of the objects constituting the model, enabling collaboration of different branches of engineering (hydraulic, structural, electrical, etc.) in a single project environment. There is little integration of geotechnics in BIM compared to other areas, in terms of the conception of virtual models. Therefore, aiming to implement geotechnical aspects into BIM modeling, the development of a parametric model of the drilling report is proposed. For this purpose, the BS data was organized and classified in a table so that it could be entered and interpreted in Autodesk Revit software. The reading, visual modeling, and data interpolation were done through visual programming. The objective was achieved, resulting in the parametric model in BIM and the visual programming codes, enabling analysis and application in the structural modeling process.

Keywords: Dynamo; Standard Penetration Test; Building Information Modeling; DNIT; Brazil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curva de Patrick Macleamy	14
Figura 2 – Algumas conotações comuns de vários termos de BIM	14
Figura 3 – Diferentes tipos de ensaio usados para a investigação do solo	18
Figura 4 – Esquema de montagem de um ensaio SPT	20
Figura 5 – Boletim de sondagem típico.....	24
Figura 6 – Aba Revit, com informações a serem exportadas	26
Figura 7 – Os parâmetros da família SPTBIM, tipo SPTBIM PS	28
Figura 8 – Seleção do arquivo Excel correspondente ao BS.....	31
Figura 9 – Importação de dados da planilha Excel	32
Figura 10 – Composição de listas específicas.....	33
Figura 11 – Obtenção das coordenadas dos PSj	34
Figura 12 – Cálculo da altura z da instância, de acordo com MPo	35
Figura 13 – Alteração de zPS em função das definições do usuário.....	35
Figura 14 – Insere família nas coordenadas iniciais	36
Figura 15 – Definição de Nome do furo e Número do relatório.....	37
Figura 16 – Parâmetro NSPT	38
Figura 17 – Parâmetros de classificação do solo	38
Figura 18 – Atualização dos parâmetros de tipo.....	39
Figura 19 – Representação do ponto de Sondagem	40
Figura 20 – Coordenadas da base de cada camada SPT	41
Figura 21 – Código de cores de representação dos semicilindros dos NSPT	42
Figura 22 – Atribuição de cores aos anéis SPT	42
Figura 23 – Definição da espessura e cota de fundo das camadas de solo	43
Figura 24 – Implementação do código de cores na representação das camadas	44
Figura 25 – Código de cores para a representação da espessura das camadas	44
Figura 26 – Profundidade e cota do nível d'água	45
Figura 27 – Mecanismo para liberar SPT (Furo de Sondagem) do código Dynamo.....	46
Figura 28 – Aspecto geral do código Dynamo de SPTBIMInsert.....	47
Figura 29 – Entrada de dados e configurações gerais	49
Figura 30 – Captura das instâncias dos PSj e suas coordenadas.....	50
Figura 31 – Recomposição das coordenadas de PSj	51
Figura 32 – Captura de propriedades adicionais de SPTBIM PS	51

Figura 33 – Captura coordenadas dos PAi, cálculo de $d_{i,j}$ e parâmetros	52
Figura 34 – Cálculo das distâncias entre PSj e PAi	53
Figura 35 – Interpolação de zPAi.....	55
Figura 36 – Interpolação de zPAi para o MI definido	56
Figura 37 – Definição de zPAi, função de MPo e Dsl	57
Figura 38 – Instanciação da família SPTBIM PA nos pontos de análise	57
Figura 39 – Captura dos valores de NSPTj,k.....	58
Figura 40 – Uniformização da matriz NSPTj,k.....	59
Figura 41 – Interpolação de NSPTj,k, considerando os 4 MI.....	59
Figura 42 – Definição de NSPTi,k, função do MI	60
Figura 43 – Interpolação de zNaj para todos os MI	60
Figura 44 – Interpolação de zNaj para o MI definido	61
Figura 45 – Representação gráfica dos NSPTi,k.....	62
Figura 46 – Representação por cores dos cilindros de NSPT	63
Figura 47 – Representação do NAI.....	63
Figura 48 – População de valores nos atributos da instância.....	65
Figura 49 – Nomeação automática dos PAi.....	66
Figura 50 – Organização dos dados para exportação em planilha Excel	67
Figura 51 – Exportação de dados para planilha Excel.....	68
Figura 52 – Exportação de dados para planilha Excel.....	69
Figura 53 – Organização dos dados na planilha.....	69
Figura 54 – Finalização da instanciação da família dos pontos interpolados	70
Figura 55 – Aspecto geral do código Dynamo de SPTBIMImport.....	71
Figura 56 – Região para implantação da estrada em Buenos Aires, Icó/CE	73
Figura 57 – Traçado da estrada (ponte em tracejado).....	74
Figura 58 – Locação dos furos de sondagem (pilares de referência)	76
Figura 59 – Furo de sondagem SP-01.....	76
Figura 60 – Furos de sondagem representados abaixo dos pilares de referência	77
Figura 61 – FS parametrizados conforme a planilha eletrônica de ensaio	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Análise de ensaios por capacidade de obtenção de parâmetros do solo	19
Quadro 2 – Método de obtenção do índice de resistência a penetração	21
Quadro 3 – Parâmetros para o desenvolvimento da família SPTBIM.....	25
Quadro 4 – Variáveis empregadas em SPTInsert e SPTImport (continua).....	29
Quadro 5 – Aspectos da geotécnicos	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS.....	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	BUILDING INFORMATION MODELING	13
2.2	MODELAGEM PARAMÉTRICA	15
2.3	O PROJETO DE FUNDAÇÕES.....	16
2.4	ESTUDO DO SUBSOLO	17
2.5	STANDARD PENETRATION TEST - SPT	19
3	DESENVOLVIMENTO	23
3.1	PLANILHA DE BOLETIM DE SONDAÇÃO	23
3.2	PREPARAÇÃO EM REVIT.....	27
3.3	IMPLEMENTAÇÃO DE SPTINSERT	28
3.3.1	LEITURA DA PLANILHA E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	31
3.3.2	COORDENADAS PARA INSERÇÃO DOS PS	34
3.3.3	INSERÇÃO DE INSTÂNCIAS DE SPTBIM PS	36
3.3.4	ATRIBUIÇÃO DE VALORES AOS PARÂMETROS DA INSTÂNCIA.....	36
3.3.5	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA	40
3.3.6	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO SPT	40
3.3.7	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CAMADAS DE SOLO.....	42
3.3.8	REPRESENTAÇÃO DO SEMICILINDRO DO NÍVEL D'ÁGUA	44
3.4	INTERPOLAÇÃO DE SONDAÇÃO SPT	48
3.4.1	DADOS DE ENTRADA.....	48
3.4.2	MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO	54
3.4.3	DEFINIÇÃO DE ZPAI POR INTERPOLAÇÃO	55
3.4.4	DEFINIÇÃO DE NSPTI,K POR INTERPOLAÇÃO	58
3.4.5	DEFINIÇÃO DE ZNAI POR INTERPOLAÇÃO	60

3.4.6	REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DOS PAI.....	61
3.4.7	REGISTRO DE VALORES NA INSTÂNCIA DA FAMÍLIA.....	64
4	APLICAÇÃO.....	72
5	EXPORTAÇÃO DE DADOS DE SONDAÇÃO IFC	78
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1 INTRODUÇÃO

Um conjunto de projetos marca o princípio de uma série de pesquisas e ensaios que vão reger as principais decisões de caracterização física e geométrica de uma construção, cujo processo é dividido em estágios subsequentes, que promovem a sincronização multidisciplinar entre o anteprojeto, o projeto básico e o projeto executivo, garantindo a concordância com as normas e diretrizes vigentes (Assalim, 2010).

A gama de informações presentes em um único projeto constitui um leque de documentos contendo planilhas, desenhos e detalhes, progressiva e constantemente revisados por diferentes equipes, sendo bastante comum a ocorrência de incoerências entre eles. Para que toda a informação seja transmitida e compreendida entre os envolvidos, dois aspectos devem ser prezados: a qualidade e a clareza das informações, e o meio pela qual elas serão transmitidas (Crotty, 2013).

A maneira com a qual um software CAD interpreta informações gráficas é arcaica, uma vez que não relaciona traços de desenho com o que elas representam no universo real. Portanto todo o detalhamento e interpretação do projeto fica sob responsabilidade do profissional. Isto significa que todas as informações dependem da clareza e organização dos traços de desenho (Crotty, 2013). Em virtude dessa dependência, mesmo após a compatibilização de arquivos, poderão existir erros, causando eventual dispêndio não previsto para resolver tais incompatibilidades durante a execução de uma obra e, conseqüentemente, o atraso da entrega (Eastman, 2011).

As plataformas digitais de modelagem denominadas *Building Information Modeling* (BIM - Modelagem da Informação da Construção), em franca evolução, permitem que um conjunto de informações que caracteriza um empreendimento seja armazenado, lido e mantido, prezando a interoperabilidade entre as diversas disciplinas envolvidas (Ellis, 2006). BIM é uma forma de representação dos aspectos geométricos e não geométricos de um edifício, baseada nos conceitos de modelagem paramétrica da informação. Por meio desta técnica (segundo o paradigma da orientação a objetos), modela-se uma cadeia sistemática e interconectada de informações, possibilitando a construção virtual de componentes que constituem a construção.

A necessária e benéfica integração entre disciplinas de projeto em BIM, no entanto, ainda não atingiu à área da geotecnia da mesma forma que nas demais áreas da AEC. Como apresentado nas revisões literárias analíticas dos autores Zhang (2016) e Piñeros (2017), as abordagens que promovem a melhor eficiência em projetos geotécnicos podem ser classificadas, em termos gerais, como abordagens baseadas em CAD e em *Geographic Information System* (GIS- sistema de informação geográfica).

A primeira abordagem utiliza a plataforma de desenho para compilar toda a informação num mapa geológico, melhorando assim a eficiência do mapeamento, enquanto a segunda procura armazenar, analisar e atualizar dados numa perspectiva espacial. Embora ambas possam melhorar a eficiência da investigação geotécnica, nelas ainda existe a divisão do processo de investigação do solo em fases isoladas, não se atentando ao processo global de análise. Por conseguinte, quando o esquema de investigação muda, todo o trabalho tem de ser refeito. Estas abordagens ignoram a coordenação entre as diferentes fases da investigação geotécnica, o que conduz a uma má utilização dos dados e a uma interpretação incorreta dos resultados (Zhang, 2016).

Sob outra perspectiva, Mata *et al* (2016) propõem um modelo de análise geotécnica nomeado *Geological & Geotechnical Information Modeling* (GGIM - modelagem da informação geológica e geotécnica), que permite não só a visualização 3D do terreno, mas também a análise global e simulação de eventos como sismos, vibrações de cravação de estacas, a variação da hidrogeologia e das características físicas, mecânicas e químicas das camadas do solo. Este conceito seria uma adaptação das características de identidade do BIM para uma perspectiva geotécnica. No entanto, sua implementação seria complexa por demandar recursos tecnológicos mais avançados e o treinamento dos usuários.

Com o intuito de contribuir com o avanço na integração da geotecnia em ambiente BIM, propôs-se implementar uma rotina de programação visual que associe o resultado da sondagem SPT a um modelo paramétrico automatizado que será visualmente compatível com a estratigrafia do subsolo, carregando todas as informações necessárias para que um software BIM possa fazer uso destes dados em outros aspectos de projeto, como a interpolação dos dados. Pode contribuir ainda para o avanço dos meios de dimensionamento automático de elementos de fundação através da extração das informações contidas no modelo paramétrico. Implementou-se, também, uma forma de exportar arquivos IFC, garantindo a “universalidade” do modelo.

Os resultados da pesquisa proposta permitirão aumentar a eficiência e segurança quanto à troca de informações de projeto, além de promover a interoperabilidade abrangendo a área geotécnica de concepção de projeto

1.1 OBJETIVOS

Produzir uma proposta de modelo paramétrico para a representação digital de um Boletim de Sondagem – BS (ou Perfil Geológico), contendo o resultado de ensaios SPT, buscando a integração da geotecnia em projetos colaborativos baseados em BIM.

São objetivos específicos:

1. Realizar uma revisão bibliográfica nos temas BIM, modelagem paramétrica, programação visual, projeto de fundações, ensaios geotécnicos e suas devidas interpretações;
2. Levantar, através da consulta à bibliografia, os requisitos de informação para o desenvolvimento de um projeto de fundação, pela análise e categorização dos resultados apresentados no BS;
3. Implementar o modelo paramétrico com base nos parâmetros previamente definidos;
4. Definir e implementar um padrão de planilha eletrônica que reorganize o layout do BS para uniformizar a leitura de dados;
5. Implementar uma rotina de programação visual para a extração de informações de planilha padrão do BS e, conseqüentemente, preencher dados no modelo paramétrico, representando-os visualmente no software BIM; e
6. Implementar também, uma rotina em programação visual para a interpolação dos pontos de sondagem (PS), a qual tenha de input apenas a localização desejada dos pontos de análise (PA).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BUILDING INFORMATION MODELING

Segundo Orlikowski (1992), *Building Information Modeling* (BIM) é uma ferramenta tecnológica de alto potencial na indústria Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), considerando ainda que se trata de uma base para o desenvolvimento de novas ferramentas de automatização, design, planejamento e organização de todo o processo construtivo.

Lawson (2005) argumenta que uma ferramenta que auxilie engenheiros e arquitetos a desenvolver projetos deve ser capaz de permitir liberdade criativa, capaz de armazenar informações para criar um universo virtual representativo da realidade, permitindo comunicação entre os integrantes de uma equipe, e apoiando o processo de concepção mental do projetista, ao invés de superficialmente realizar suas ações de desenho. Atualmente, o BIM é a tecnologia que mais se aproxima do “agente ideal” imaginado por Lawson, e que está em constante desenvolvimento, aprimorando a representação realística pela modelagem da informação.

Portanto, a organização promovida em etapas busca aproximar o fluxo de desenvolvimento de projeto à Figura 1, cuja interpretação permite visualizar como a modelagem em BIM influencia nos custos de um projeto. A linha 1 indica que o investimento aplicado nas etapas de anteprojeto, projeto base e projeto executivo, tem um efeito positivo sob o custo total da obra, pois o planejamento diminui a ocorrência de imprevistos e erros, evitando o gasto extra de recursos para repará-los. A linha 2 mostra a tendência de aumento exponencial do custo de alterações de projeto nas etapas finais de execução. As linhas 3 e 4 representam os fluxos de trabalho tradicional e com o auxílio do BIM, respectivamente.

É notório, portanto, que o esforço de um projeto auxiliado por BIM está concentrado nas etapas iniciais, enquanto que, no método tradicional, o esforço aumenta à medida que a fase do projeto avança, atingindo um máximo durante a fase de liberação dos documentos. Estas linhas se correlacionam de forma a expor que o método tradicional se desenvolve com pouco esforço na fase preliminar, o que não beneficia o desempenho e economia (Curva 1) e, por conseguinte, as mudanças sugeridas neste método têm um custo de implementação maior do que se estas fossem identificadas na fase inicial (Curva 2).

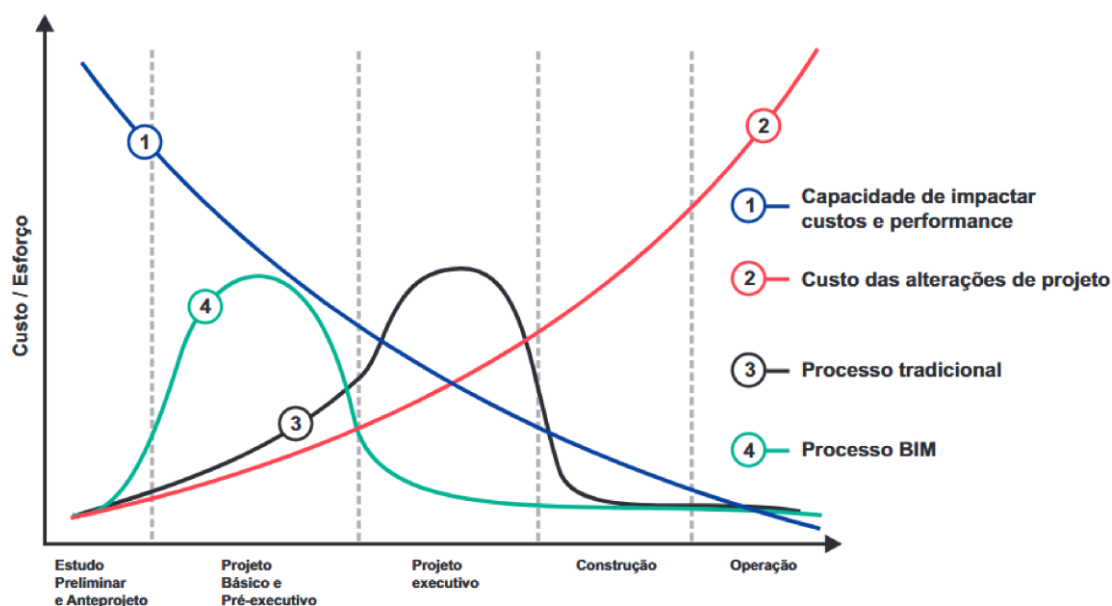


Figura 1 – Curva de Patrick Macleamy

Fonte: Morale (2015)

Em geral, no entanto, não existe um acordo no significado de BIM, diferentes interpretações são apresentadas de forma a melhor se adaptar a uma pesquisa, ou de acordo com a experiência de trabalho de um usuário, ou com a área de aplicação (Succar, 2009; Zhang, 2015). Tais definições podem ser contextuais ou descritivas, mas convergem para uma linha de pensamento semelhante, como demonstrado na Figura 2, a de que BIM é uma inovação tecnológica da qual a organização e a interoperabilidade são características inerentes do seu processo de modelagem (Zhang, 2015).

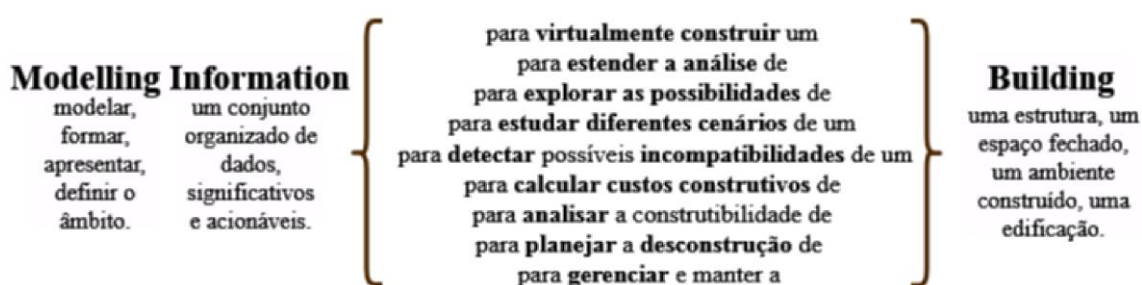


Figura 2 – Algumas conotações comuns de vários termos de BIM

Fonte: adaptado de Succar (2009)

A interoperabilidade é fundamental para que a tecnologia BIM possa ser aplicada, mas para a plenitude desta interação, diferentes programas precisam trocar dados entre si, permitindo assim, que o projeto arquitetônico seja concebido em um software, enquanto que sua concepção e a análise estrutural, por exemplo, seja feita em outro. Isto é, deve existir uma linguagem franca (universal) de leitura e escrita.

Em 1994, um corpo técnico de representantes mundiais da indústria AEC e principais fornecedores de CAD se reuniram para desenvolver e estudar esta ideia, formando a *International Alliance for Interoperability* (IAI - Aliança Internacional para Interoperabilidade). Desde então, a IAI, atual *buildingSMART International* (bSI), vem desenvolvendo um conjunto abrangente de especificações de componentes, chamado *Industry Foundation Classes* (IFC), capaz de fornecer uma descrição neutra e sistemática de todas as principais famílias de componentes do setor de construção (Crotty, 2013).

Assim, qualquer sistema compatível com IFC deve ser capaz de gerar as informações que descrevem inteiramente uma construção. Da mesma forma, qualquer sistema em conformidade deve ser capaz de importar esses detalhes e usá-los em seu trabalho interno, sem a necessidade de intervenção por parte dos usuários (Crotty, 2013).

Em suma, a indústria AEC está em constante adaptação às novas tecnologias. Dentre estas, BIM vem agregando benefícios no ciclo de vida dos projetos, se tornando objeto de pesquisa e base para o desenvolvimento de novas ferramentas.

2.2 MODELAGEM PARAMÉTRICA

Os modelos BIM são caracterizados por objetos paramétricos representativos de elementos físicos, compostos por uma base de dados semanticamente rica, que representa não apenas as características físicas desses objetos, mas também as não físicas, na forma de atributos comportamentais, interrelações de objetos e regras e restrições de projeto (Succar 2009; Halfawy e Froese, 2002).

Esse tipo de modelagem torna viável a concentração e a manutenção da consistência das informações de um produto e potencializa a automação do processo de projeto. Um dos aspectos mais importantes da modelagem paramétrica é a sua capacidade de estabelecer relações entre os vários elementos que compõem um modelo, sendo esta capacidade a diferença essencial em relação aos desenhos CAD tradicionais (Monedero, 2000). De um modo geral, o CAD, apesar de utilizar propriedades parametrizadas para descrever as suas entidades gráficas, não permite que as relações entre entidades definam formas, posições e outros parâmetros, característica principal da modelagem paramétrica.

As restrições paramétricas retiram do projetista a responsabilidade por algumas tomadas de decisão, possibilitando a criação de modelos complexos e ricos em informação (Sacks et al, 2004). Além disso, diferentes opções de projeto podem ser testadas e visualizadas rapidamente, porque a alteração de um parâmetro pode ser propagada por todo o modelo, de modo a que as restrições impostas inicialmente permaneçam satisfeitas.

O processo de trabalho no Autodesk *Revit*, um dos softwares BIM mais difundidos no mercado, baseia-se neste conceito (Waterhouse, 2017). Na sua terminologia, a unidade básica de construção do modelo é designada por objeto. Este corresponde à instanciação, ou materialização, de uma determinada classe de objetos. A instanciação ocorre através da atribuição de valores a esses parâmetros e regras. No *Revit*, uma classe ou modelo paramétrico é designado por Família. Assim, diz-se que um modelo BIM é construído a partir da instanciação de várias Famílias.

2.3 O PROJETO DE FUNDAÇÕES

A estabilidade estrutural de uma obra de arte é garantida pelo trabalho conjunto da superestrutura e da infraestrutura que, juntas, suportam forças ativas externas, caracterizadas por ações permanentes, variáveis e excepcionais. As forças externas provocam solicitações, produto da transmissão de tensões a cada seguimento estrutural por meio de forças normal, cortante, momentos fletor e/ou torção (Cintra *et al*, 2011).

Com o intuito de guiar o primórdio do projeto de fundações, a ABNT NBR 6122/2022, propõe um programa de exploração do solo, cuja primeira etapa deve ser o pleno reconhecimento geológico do terreno, avaliando mapas geológicos da região, a vegetação local e se o terreno recebeu aterro recentemente, buscando identificar possíveis patologias relacionadas ao solo em construções vizinhas, acessibilidade do local e natureza de drenagem. Esse estudo de campo fornece a primeira impressão sobre o tipo de solo e os problemas que podem ser encontrados durante as operações de perfuração.

Ademais, cortes próximos ao local podem fornecer indicações sobre a estratificação do subsolo, e rachaduras em estruturas próximas podem indicar recalque por camadas de argila mole ou presença de solos expansivos (Braja e Sobhan, 2014). Para encontrar e documentar as características físicas, mecânicas e de estratigrafia do subsolo, é recomendado pela norma que haja a investigação detalhada do solo, pela execução de ensaios *in situ* e da coleta de amostras para determinação de propriedades em laboratório.

A depender das características geológicas e dimensões do terreno, pode ser necessário sua divisão em seções representativas de pouca variabilidade nas suas características geotécnicas (ABNT NBR 6122/2022). O projetista das fundações é o responsável por realizar estas análises de variabilidade do terreno, programar novos ensaios e analisar os dados obtidos, afim de obter o bom desempenho das fundações.

Com os resultados dos ensaios de campo (que serão apresentados na seção 4), é possível determinar a tensão admissível ou tensão resistente de cálculo do terreno. Para isso, alguns fatores devem ser considerados, como recomendado pela norma:

- Características geomecânicas do subsolo;
- Profundidade da ponta ou base da fundação;
- Dimensões e forma dos elementos de fundação;
- Influência e posição do nível d'água;
- Eventual alteração das características do solo (expansivos, colapsíveis, etc.) devido a agentes externos (encharcamento, contaminação, agressividade, etc.);
- Alívio de tensões;
- Características ou peculiaridades da obra;
- Sobrecargas externas;
- Inclinação da carga;
- Inclinação do terreno;
- Estratigrafia do terreno;
- Recalques admissíveis; e
- Eventual ocorrência de solicitações adicionais como o atrito negativo e esforços horizontais devido a carregamento assimétricos (no caso de fundações profundas).

Para estimar a tensão admissível, é preciso utilizar e interpretar um ou mais dos seguintes procedimentos: prova de carga sobre placa, descrito na ABNT NBR 6489/2019; métodos teóricos, teorias de capacidade de carga, nos domínios de validade de sua aplicação, desde que contemplem todas as particularidades do projeto, inclusive a natureza do carregamento (drenado ou não drenado); e os métodos empíricos, que relacionam resultados dos ensaios com tensões admissíveis ou resistentes de cálculo. Estas tensões devem também atender ao estado limite de serviço.

Portanto, o projeto de fundações é diretamente dependente do estudo do subsolo, para que sejam conhecidas as características de resistência das suas respectivas camadas, permitindo que o projetista escolha o tipo de fundação adequada.

2.4 ESTUDO DO SUBSOLO

Nos estudos das propriedades mecânicas dos solos, para uma simplificação das análises, considera-se o solo como uma massa homogênea, elástica e sob carregamentos isotrópicos, como sugerido por Terzaghi e em suas hipóteses para a dedução de equações que descrevem seu comportamento, mas a composição natural e condições de solicitação real do solo dependem dos fatores circundantes.

Tendo em vista esta complexidade de fatores, fica evidente que, para o entendimento inequívoco do comportamento do solo, os ensaios de exploração são de extrema importância, pois permitem a determinação da estratificação e natureza do solo, a retirada de amostras amolgadas e indeformadas para identificação visual e ensaios de laboratório, determinação das profundidades impenetráveis (quando existentes), a observação das condições de drenagem do local e a determinação da posição do nível d'água.

Os métodos de investigação do solo são diversos. Alguns ensaios consistem na simples cravação de um elemento no terreno medindo sua penetração. Outros são equipados com sensores eletrônicos que medem por pressão e força, por exemplo. Os ensaios mais comuns no Brasil são apresentados na Figura 3 (Schnaid e Odebrecht, 2012). Dentre eles, a sondagem SPT, será o foco desta pesquisa, por ser de simples execução, economicamente vantajoso em relação aos demais apresentados, e tem como resultado informações que podem ser utilizadas de forma apropriada no projeto de fundações.

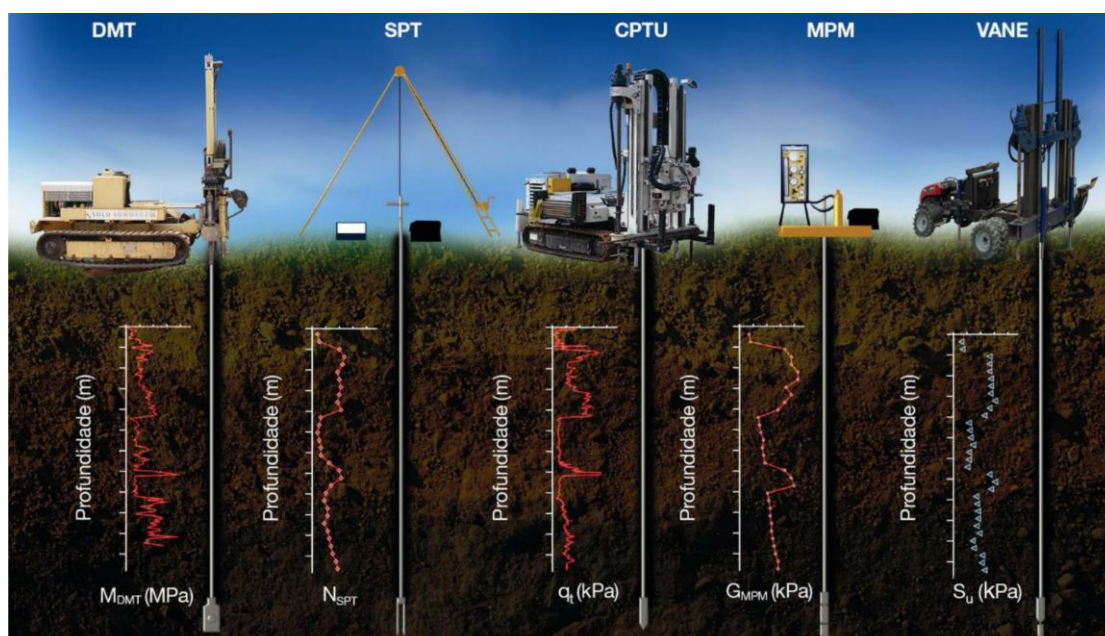


Figura 3 – Diferentes tipos de ensaio usados para a investigação do solo

Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012)

No Quadro 1, são apresentados alguns métodos de ensaios e um resumo das características do solo que são possíveis de medir com cada um deles, entre as quais: ângulo de atrito interno efetivo do solo (ϕ'), resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), módulo de variação volumétrica (mv), módulo cisalhante (G), coeficiente de empuxo no repouso (K_0) e razão de pré-adensamento (OCR). Aplicabilidade dos valores do Quadro: “A” alta, “B” moderada, “C” baixa, “-” inexistente.

A simples observação das informações contidas no Quadro 1 indica que a escolha do tipo de ensaio deve ser compatível com as características do subsolo e as propriedades a serem medidas. Por exemplo, o SPT é particularmente adequado à prospecção de solos granulares e à previsão de valores do ângulo de atrito interno, mas não é utilizado com sucesso na previsão da resistência não drenada de depósitos de argilas moles, nesses casos, os ensaios de palheta e piezocone devem ser adotados para essa finalidade (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Quadro 1 – Análise de ensaios por capacidade de obtenção de parâmetros do solo

	Equipamento	Tipo de solo	Perfil	Parâmetros									
				u	ϕ'	S_u	D_r	m_v	c_v	K_0	G_0	σ_h	OCR
Penetrômetro	Dinâmicos	C	B	-	C	C	C	-	-	-	C	-	C
	Mecânicos	B	A/B	-	C	C	B	C	-	-	C	C	C
	Elétricos (CPT)	B	A	-	C	B	A/B	C	-	-	B	B/C	B
	Piezocone (CPTU)	A	A	A	B	B	A/B	B	A/B	B	B	B/C	B
	Sísmicos (SCPT/SCPTU)	A	A	A	B	A/B	A/B	B	A/B	B	A	B	B
	Dilatômetro (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B
	Standard Penetration Test (SPT)	A	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	C
Pressiômetro	Resistividade	B	B	-	B	C	A	C	-	-	-	-	-
	Pré-furo (PBP)	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C
	Autoperfurante (SBP)	B	B	A	B	B	B	B	A	B	A	A/B	B
	Cone-Pressiômetro (FDP)	B	B	-	C	B	C	C	C	-	A	C	C
Outros	Palheta	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	-	B/C
	Ensaio de placa	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B
	Placa helicoidal	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B
	Permeabilidade	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-
	Ruptura hidráulica	-	-	B	-	-	-	-	C	C	-	B	-
	Sísmicos	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	B

Fonte: adaptado de Schnaid e Odebrecht (2012) e Lunne *et al* (2002)

Os ensaios pressiométricos de placa e sísmicos são as técnicas mais adequadas na determinação do módulo de deformabilidade dos solos e esses aspectos são de particular importância na concepção de programas geotécnicos de investigação necessários à solução de problemas de fundações, contenções e escavações, entre outros. A retirada de amostras indeformadas para a realização de ensaios de laboratório, visando à determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade, pode ser adotada como procedimento complementar à investigação de campo.

2.5 STANDARD PENETRATION TEST - SPT

Nos métodos de investigação detalhada do terreno, destaca-se a sondagem a percussão SPT, o mundialmente mais popular, rotineiro e econômico ensaio de investigação geotécnica, servindo como indicativo da densidade de solos granulares e aplicado também na identificação da consistência de solos coesivos, e mesmo de rochas brandas, sendo seu resultado usado sistematicamente nos métodos rotineiros de projeto de fundações diretas e profundas, especialmente no Brasil (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Internacionalmente, não existe uma padronização do ensaio SPT. Ainda que os procedimentos e mecanismos sejam semelhantes, as diferenças existem em virtude do nível de investimento e desenvolvimento de cada país quanto ao ensaio. Apesar disso, existe o aprimoramento da técnica de escavação por país, adaptando o ensaio às condições do subsolo, uma vez que os solos em diferentes continentes possuem origem, granulometria, e propriedades diversas (Ireland *et al*, 1970; Garcia *et al*, s.d.).

O ensaio caracteriza-se pela medição da resistência dinâmica do solo conjugada a uma sondagem de simples reconhecimento, cujo procedimento consiste na cravação do amostrador no fundo do ponto de sondagem (revestido ou não) a cada golpe pendular de um martelo de 65Kg a uma altura de 750 mm, aplicado de forma mecânica ou manual (ABNT NBR 6484/2020), conforme ilustra a Figura 4.

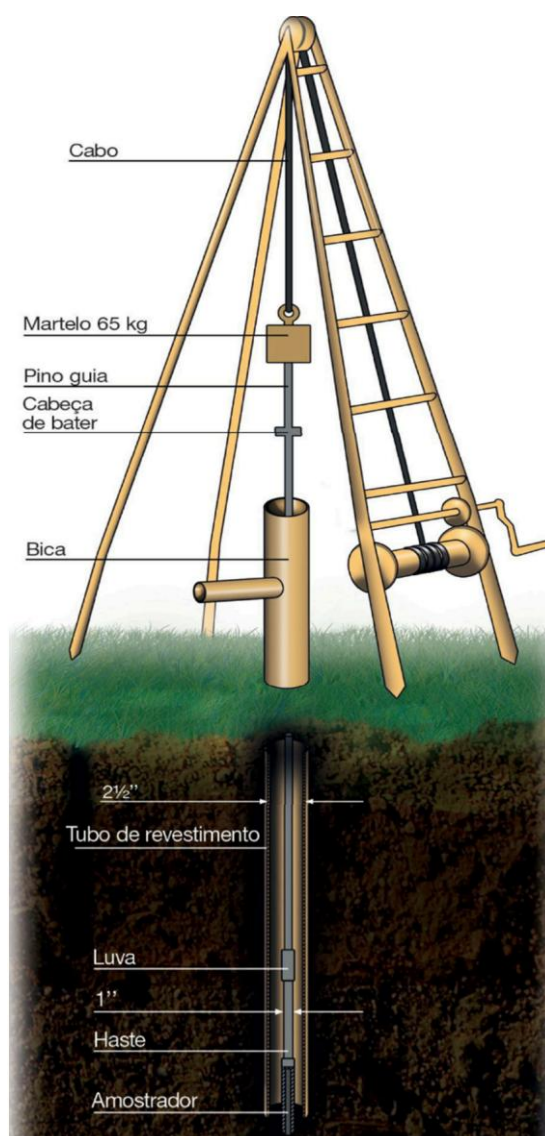


Figura 4 – Esquema de montagem de um ensaio SPT

Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012)

Por norma brasileira, a locação dos pontos de sondagem deve ser indicada em planta pelo contratante, na qual deve também constar a referência de nível (RN), com cota preferencialmente georreferenciada, adotada para o nivelamento dos pontos de sondagem e, na falta de dados sobre a RN, deve-se adotar uma referência arbitrária fora do perímetro da obra, como uma calçada (ABNT NBR 6484/2020).

A sondagem se inicia com a escavação de profundidade de 1m com o emprego de trado concha ou cavadeira manual. Então, é feita a instalação do primeiro segmento do tubo de revestimento dotado de sapata cortante. Esta escavação inicial permite identificar a espessura da camada superficial com presença de raízes, se for o caso. No entanto, a norma permite alteração nesta primeira escavação manual, desde que as novas condições sejam justificadas na documentação técnica fornecida pelo contratante. Ou seja, o ensaio pode ser iniciado na superfície do terreno ao invés de a um metro abaixo.

Em seguida, são intercaladas operações de ensaio e amostragem com o trado helicoidal, até atingir o nível d'água freático ou quando o avanço da perfuração com o emprego do trado for inferior a 50mm após 10min de operação. Em tal situação, passa a ser empregado o método de perfuração por circulação de água (ou lavagem) (ABNT NBR 6484/2020). A cada metro de perfuração, devem ser colhidas amostras do solo por meio do amostrador padrão, com execução do SPT.

O índice de resistência a penetração NSPT é expresso como a soma do número de golpes da segunda e terceira etapas de penetração de 15 cm, mesmo quando a penetração não atingir os 15 cm completos, como apresentado no Quadro 2. Esse índice pode ser utilizado para estimar a tensão admissível do solo.

Quadro 2 – Método de obtenção do índice de resistência a penetração

Penetração	Registro dos golpes	Exemplo
Penetração de 45 cm Três trechos iguais de 15 cm	Golpes por trecho	3/15 - 3/15 - 4/15
Penetração diferente de 45 cm Trechos diferentes de 15 cm	Número de golpes para uma penetração imediatamente superior a 15	3/17 - 4/14 - 5/15
Penetração superior a 45 cm com a aplicação do primeiro golpe de martelo	Número de golpes e respectiva penetração	1/58
Penetração com haste e amostrador sem número de golpes	Sem número de golpes	PH/50
Penetração com martelo, haste e amostrador sem número de golpes	Sem número de golpes	PH/70
Penetração superior a 45 cm com aplicação de poucos golpes do martelo	Número de golpes e respectiva penetração nos respectivos intervalos	1/33 - 1/20
Penetração inferior a 45 cm Se em qualquer dos três seguimentos o número de golpes ultrapassar 30	Número de golpes para cada intervalo de penetração	32/15
Se não for observado o avanço do amostrador durante a aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo	Número de golpes para zero centímetros de penetração	5/0.0

Fonte: adaptado de ABNT NBR 6484/2020

Este tipo de ensaio destaca-se pela simplicidade do equipamento, baixo custo e obtenção de um valor numérico de ensaio que pode ser relacionado por meio de propostas não sofisticadas, mas diretas, com regras empíricas de projeto (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Os Boletins de Sondagem (BS), também conhecidos como Relatórios de Sondagem, constituem o documento final que expressa os resultados dos ensaios de prospecção realizados em pontos específicos de uma área para fins de projeto de fundação (ABEF, 2012). Um Boletim de Sondagem, portanto, visa apresentar as características físicas e mecânicas do solo, endereçado principalmente ao engenheiro responsável pelo projeto de fundações. Normalmente, esses boletins são produzidos através de uma planilha eletrônica padronizada, e entregue aos profissionais competentes na forma de arquivos PDF para posterior consulta.

Com os resultados do ensaio, é possível definir os aspectos que caracterizam o ponto de sondagem de forma física e geométrica, ao qual será atribuído como parâmetro de identidade do modelo paramétrico em BIM, ditando a automatização da representação visual do elemento e populando o modelo com os dados provenientes da planilha de resultados, garantindo a existência do vínculo entre o objeto real e a sua representação virtual, consequentemente atribuindo novas possibilidades de interoperabilidade entre o projeto de fundações e os demais ramos da indústria AEC.

3 DESENVOLVIMENTO

Este relatório apresenta o desenvolvimento dos protótipos de dois programas computacionais baseados na linguagem de programação visual *Dynamo* para o ambiente do *Revit*:

1. *SPTImport (SPTImport.Dyn)*

Importação de dados contidos em relatórios de sondagem para o modelo paramétrico de informação composto *SPTBIM.rfa* para fins de disponibilização de dados geotécnicos em BIM, viabilizando futuras consultas, e

2. *SPTInterpol (SPTInterpol.Dyn)*

Inserção de novos pontos de sondagem, baseado na posição de elementos de referência existentes no modelo, para os quais os valores do nível do furo, SPT e nível d'água serão interpolados.

3.1 PLANILHA DE BOLETIM DE SONDAGEM

A Figura 5 ilustra uma página extraída da planilha eletrônica desenvolvida em *MS Excel* para a apresentação de um Boletim de Sondagem (BS) típico. Não há a necessidade de que seja este o formato. Os parâmetros identificados na planilha como relevantes para a produção deste trabalho estão presentes no Quadro 3, excluindo aquele com destaque em azul.

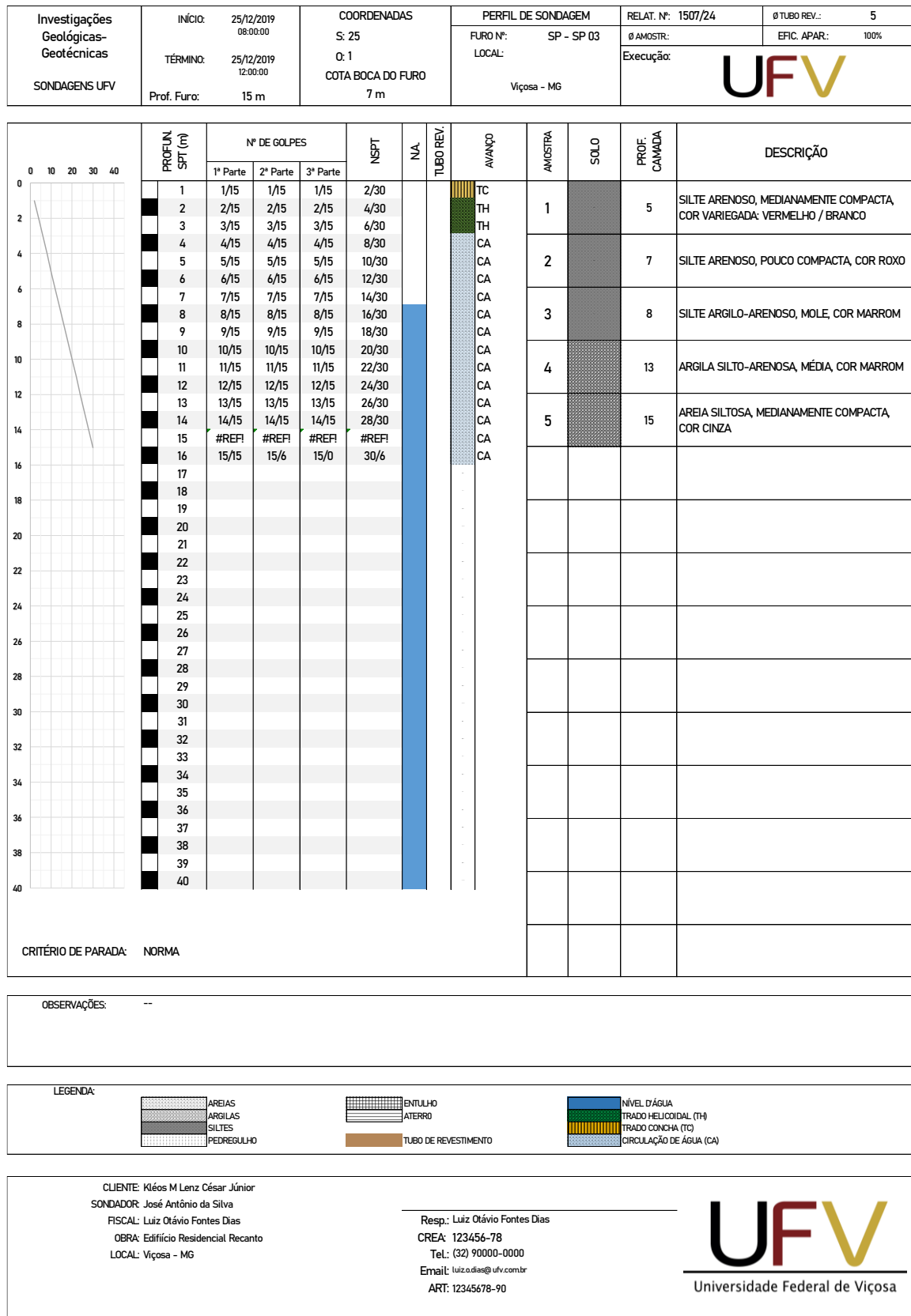


Figura 5 – Boletim de sondagem típico

Quadro 3 – Parâmetros para o desenvolvimento da família SPTBIM

Parâmetro	Tipo	Grupo	Descrição
Número do relatório	Texto	Dados	Número do relatório que constitui o BS.
Nome do Ponto de Sondagem	Texto	Dados	Nome identificador do furo de sondagem.
Documentos	URL	Dados	Documentos relacionados, apresentados na forma de URL.
xPS xPA	Número	Cotas	Abcissa (X) da posição do PS ou PA, com base na abcissa de referência xRef.
yPS yPA	Número	Cotas	Ordenada (Y) da posição do PS ou PA, com base na ordenada de referência yRef.
zPS zPA	Número	Cotas	Cota (Z) da posição do PS ou PA, com base na cota de referência zRef.
xRef	Número	Cotas	Abcissa (X) do ponto de referência.
yRef	Número	Cotas	Ordenada (Y) do ponto de referência usado.
zRef	Número	Cotas	Abcissa (X) do ponto de referência usado.
NSPT	Texto de múltiplas linhas	Camadas	Número de golpes NSPT, separados por vírgula.
Nível d'água	Número	Camadas	Cota do nível d'água, medido em relação à superfície do solo.
Profundidade das camadas	Texto de múltiplas linhas	Camadas	Profundidade de cada uma das camadas de solo identificadas, separadas por vírgula.
Classificação do solo	Texto de múltiplas linhas	Camadas	Descrição sumária do solo, correspondente às camadas identificadas.
Método de interpolação	Número inteiro	Outros	Número inteiro correspondente ao método de interpolação (MI).
Método de posicionamento	Número inteiro	Outros	Número inteiro correspondente ao método de posicionamento da instância de SPTBIM.RFA no modelo.
Trava	Sim/Não	Outros	Marcador (sim ou não) se os elementos de representação gráfica estão fixados no modelo ou não.

Qualquer outro formato de BS pode ser utilizado, conquanto que os resultados a serem modelados em *Revit* sejam formatados numa aba à parte, intitulada *Revit*, cujo conteúdo deve seguir a formatação apresentada na Figura 6. Buscando automação do processo, todas as informações contidas na estrutura da aba *Revit* é extraída da planilha principal, buscando-se apenas ater-se à formatação proposta, a qual será carregada a partir do programa *SPTImport*.

A coluna A apresenta os títulos dos parâmetros e seus respectivos valores são posicionados na coluna B. Portanto, a coluna A terá função meramente de organização da aba. Assim, na célula A2 lê-se “No PS” (número do ponto de sondagem), cujo valor correspondente é posicionado em B2: “SP01”, enquanto que em B10, define-se a profundidade do Nível d'água: 1,00m.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	No Relatório	1507/24	5,00	SILTE ARENOSO	2								
2	No PS	SP01	7,00	SILTE ARENOSO	4								
3	xPS	4,00	8,00	SILTE ARGILLO-ARENOSO	6								
4	yPS	5,00	13,00	ARGILA SILTO-ARENOSA	8								
5	zPS	2,00	15,00	AREIA SILTOSA	10								
6	xRef	1,00			12								
7	yRef	2,00			14								
8	zRef	3,00			16								
9	Profundidade	15,00			18								
10	Nível d'água	1,00			20								
11					22								
12					24								
13					26								
14					28								
15					30								
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31	No Relatório	1507/24	1,00	SILTE ARENOSO	40								
32	No PS	SP02	3,00	SILTE ARENOSO	30								
33	xPS	11,00	6,00	SILTE ARGILLO-ARENOSO	20								
34	yPS	9,00	10,00	ARGILA SILTO-ARENOSA	15								

Figura 6 – Aba Revit, com informações a serem exportadas

A coluna C apresenta, linha à linha, o valor das profundidades de base das camadas identificadas na estratificação do solo. Assim, tem-se, no exemplo da Figura 6, 5 camadas. A primeira tem 5,00m espessura, com profundidade definida da superfície (0,00m) a 5,00m. A quinta camada encontra-se à 15,00m, com 2m de espessura (15,00 - 13,00). A coluna D apresenta a classificação do solo, na medida de profundidade correspondente. Os valores de SPT, tipicamente medido a cada metro de profundidade do amostrador, é apresentado, linha a linha, na coluna E.

Esta estrutura inicia-se na linha 1. Havendo outro ponto de sondagem, a mesma será repetida a partir da linha 31, e assim por diante (na hipótese de um terceiro ponto, este será apresentado, adotando-se a mesma estrutura de informações, a partir da linha 61).

3.2 PREPARAÇÃO EM REVIT

As seguintes medidas devem ser realizadas no ambiente do *Revit*, previamente à aplicação do método proposto:

1. Configurar as unidades de medidas (recomenda-se que as distâncias sejam fornecidas em metros (m)).
2. Criar um nível, normalmente situado abaixo dos elementos da estrutura, para a inserção da família. Sugere-se identificar este nível com o nome “SPT”.
3. Inserir o arquivo de família denominado SPTBIM.rfa, que possui dois tipos: SPTBIM PS (família para representação dos pontos de sondagem, conforme levantados no BS) e SPTBIM PA (representação dos pontos de sondagem na posição dos elementos de interesse – pontos de análise, que terá seus valores interpolados).

A família do PS é geometricamente representada apenas por um símbolo de anotação. Os atributos de tipo e de instância foram identificados para a concepção da família conforme o Quadro 3. A Figura 7 ilustra o processo de parametrização da família através do diálogo Tipos de famílias, enquanto de sua composição:

Tipos de famílias

Digite o nome: SPTBIM PS

Parâmetros de pesquisa

Parâmetro	Valor	Fórmula	Bloquear
Restrições			
Elevação-padrão	0,0000		☐
Camadas			
NSPT (padrão)			
Nível d'água (padrão)	0,000000		
Profundidade das camadas (padrão)			
Classificação do solo (padrão)			
Cotas			
Deslocamento	0,0000	=	☐
xPS (padrão)	0,000000	=	
yPS (padrão)	0,000000	=	
zPS (padrão)	0,000000	=	
xRef	0,000000	=	
yRef	0,000000	=	
zRef	0,000000	=	
Parâmetros IFC			
Tipo IFC predefinido [Tipo]		=	
Exportar tipo para IFC como		=	
Dados			
Documentos		=	
Nome do Ponto de Sondagem (padrão)		=	
Número do relatório		=	
Outros			
Método de Interpolação (MI)	1	=	☐
Método de Posicionamento (MP)	1	=	☐
Trava elementos graficos	☐	=	
Dados de identidade			

Como posso gerenciar meus tipos de família?

Gerenciar tabelas de pesquisa...

OK Cancelar Aplicar

Figura 7 – Os parâmetros da família SPTBIM, tipo SPTBIM PS

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DE SPTINSERT

O Quadro 4 apresenta, em ordem alfabética, uma lista de variáveis empregadas na implementação dos dois programas supracitados, os grupos em que foram gerados em cada programa, e uma descrição sumária. Embora não referenciadas diretamente pelo *Dynamo*, facilita a compreensão por parte do leitor.

Quadro 4 – Variáveis empregadas em SPTInsert e SPTImport (continua)

Variável	Grupo		Descrição
	SPTInsert	SPTImport	
ArL	1		Identificador do arquivo <i>Excel</i> de leitura do BS.
$ArSa$		1	Arquivo de saída <i>Excel</i> para escrita dos resultados.
$CaCsjk$	2.2		Classificação do solo por camada k de cada PS.
$CaEsjk$	6.1		Espessura de cada camada de solo k , de cada PSj.
$CaInj$	6.2		Lista dos identificadores das instâncias dos semicilindros de representação gráfica do solo classificado de cada PS.
$CaPfjk$	2.2		Profundidade da cama k do solo em cada PS.
DBj	2.2		Lista contendo todas as informações gerais do BS.
$di1$		3.2	Lista contendo as distâncias entre o PAi e o PSj mais próximo.
Lst	2.1		Lista contendo todas as informações contidas na planilha do BS.
Dsl	1	1	Deslocamento vertical a ser aplicado às instâncias de SPTBIM, variando de 0 a -50m, de 1 a 1m.
$DslPS$		2.2	Deslocamento vertical aplicado nas instâncias de SPTBIM PS.
Dsp	1	1	Desvincula objetos de representação do PS ou do PA ao sair do <i>Dynamo</i> .
$f1$		3.2	Fator correspondente a $1/di,j^p$, para aplicação na interpolação por MI=1.
$Indi1$		3.2	Lista contendo os índices de posição que identifica o PSj mais próximo do PAi .
$Indi2$		3.2	Lista contendo os índices de posição que identifica o segundo PSj mais próximo do PAi .
MI		1	Método de Interpolação
MPo	1	1	Método de posicionamento vertical das instâncias de SPTBIM.
$NAInj$	7		Lista dos identificadores das instâncias dos cilindros de representação gráfica do NAj .
$NAIni$		6.3	Lista dos identificadores das instâncias dos cilindros de representação gráfica do NAi .
$nCaj$	2.2	2.3	Número de camadas classificadas em cada PS.
$nNSPT$		5.2	Número máximo de camadas NSPT entre todos os PSj .
$nNSPTi$		5.4	Número de camadas que caracteriza cada um dos PAi
$nNSPTj$	2.2	5.2	Número de camadas que constituem os NSPT.
$NoRl$		2.3	Número do relatório de sondagem
nPA		3.1	Número de pontos de análise
nPS	2.2	2.1	Número de pontos de sondagem encontrados na planilha <i>Excel</i> que contém o BS.
nPt		7.2	Número total de pontos de sondagem, incluindo os pontos interpolados.
$NSPTik$		5.4	Número de golpes em cada camada que caracterizam o SPT do PAi .
$NSPTIni$		5.6	Lista com os identificadores das instâncias de semicilindros de representação gráfica do $SPTi$.

Quadro 4 – Variáveis empregadas em SPTInsert e SPTImport (conclusão)

Variável	Grupo		Descrição
	SPTInsert	SPTImport	
<i>NSPTInj</i>	5.2		Lista com os identificadores das instâncias de semicilindros de representação gráfica do <i>SPTj</i> .
<i>NSPTjk</i>	2.2	5.1	Valor de SPT em cada camada <i>k</i> de cada PS.
<i>NSPTjkTr</i>		5.2	Lista uniformizada e transposta dos valores de NSPT em cada camada <i>k</i> de cada PS.
<i>Nvl</i>	1	1	Nível de assentamento do objeto de representação do PS e/ou PA no Revit.
<i>ORIni</i>		1	Lista com os identificadores internos dos Objetos de Referência ORI.
<i>p</i>		1	Fator de potência para aplicação em MI=1
<i>PAIni</i>		4.4	Identificador interno da instancia do objeto que caracteriza o <i>PAi</i> .
<i>PAIdi</i>		7.2	Nome de identificação do <i>PAi</i> .
<i>PSIdj</i>		2.3	Nome de identificação do <i>PSj</i> .
<i>PSInj</i>	4.1	2.1	Identificador interno Instância dos <i>PSj</i> .
<i>PtPAi</i>		3.1	Coordenada x,y do <i>PAi</i>
<i>PtPSj</i>	3.2	2.2	Ponto espacial do <i>PSj</i> : (<i>xPSj</i> , <i>yPSj</i> , <i>zPSj</i>).
<i>PtPSRj</i>		2.1	Coordenada x,y,z do ponto de aplicação do PS.
<i>R1</i>		4.1,5.3,6.1	Cálculo de <i>zPAi</i> , <i>NSPTi,k</i> e <i>zNAi</i> para o MI=1.
<i>R2</i>		4.1,5.3,6.1	Cálculo de <i>zPAi</i> , <i>NSPTi,k</i> e <i>zNAi</i> para o MI=2.
<i>R3</i>		4.1,5.3,6.1	Cálculo de <i>zPAi</i> , <i>NSPTi,k</i> e <i>zNAi</i> para o MI=3.
<i>R4</i>		4.1,5.3,6.1	Cálculo de <i>zPAi</i> , <i>NSPTi,k</i> e <i>zNAi</i> para o MI=4.
<i>Sdi</i>		3.2	Lista contendo a soma das primeiras e segundas distâncias mais próximas entre <i>PAi</i> e <i>PSj</i> .
<i>Sf1</i>		3.2	Soma de todos os <i>f1</i> relativo ao <i>PAi</i> .
<i>Trv</i>	1	1	Trava objetos contra alterações, no ambiente do Revit.
<i>xPAi</i>		3.1	Ordenada (x) do ponto em análise i.
<i>xPSj</i>	3.1	2.2	Ordenada (x) do ponto de aplicação do <i>PSj</i> .
<i>xPSRj</i>	3.1	2.1	Ordenada (x) do ponto referenciado de aplicação do <i>PSj</i> .
<i>xRef</i>	3.1	2.2	Ordenada (x) do ponto de referência.
<i>yPAi</i>		3.1	Abscissa (y) do ponto em análise i.
<i>yPSj</i>	3.1	2.2	abscissa (y) do ponto de aplicação do <i>PSj</i> .
<i>yPSRj</i>	3.1	2.1	abscissa (y) do ponto referenciado de aplicação do <i>PSj</i> .
<i>yRef</i>	3.1	2.2	Abscissa (y) do ponto de referência.
<i>zNAi</i>		6.1	Cota (z) da profundidade do nível d'água do <i>PAi</i> .
<i>zNAj</i>		6.1	Cota (z) da profundidade do nível d'água do <i>PSj</i> .
<i>zPAi</i>		4.3	Cota (z) do ponto em análise i.
<i>zPAn</i>		4.2	Cota (z) do <i>PAi</i> , com valor interpolado pelo método MI
<i>zPARi</i>		4.3	Cota (z) do ponto em análise i, referenciado em <i>zRef</i> .
<i>zPSj</i>	3.2	2.2	Cota (z) do ponto de aplicação do <i>PSj</i> , considerando <i>MPo</i> e <i>Dsl</i> .
<i>zPSRj</i>	3.1	2.1	Cota (z) do ponto de referenciado aplicação do <i>PSj</i> .
<i>zRef</i>	3.1	2.2	Cota (z) do ponto de referência.

3.3.1 Leitura da planilha e organização dos dados

O algoritmo ilustrado na Figura 8 (Grupo 1) apresenta os nós de captura das informações de entrada. *File Path*, cujo resultado de saída será tratado com o identificador *ArL* (Arquivo de Leitura, destacado entre colchetes), permite que o usuário selecione a planilha *Excel* correspondente ao Boletim de Sondagem (BS) com as características de um ou mais Pontos de Sondagem (PS) realizado(s) em campo. Observa-se que o arquivo SPTBIM BS.xlsm foi selecionado.

Através de *Custom Selection*, define-se o Método de Posicionamento (*MPo*) para a inserção das instâncias representativas dos PS que ocorrerá, portanto, em uma das seguintes condições:

1. Na posição definida no PS.
A instância será inserida nas coordenadas definidas no BS, considerando o ponto de referência ($xRef, yRef, zRef$), que será mostrada na superfície do terreno, na cota levantada em campo.

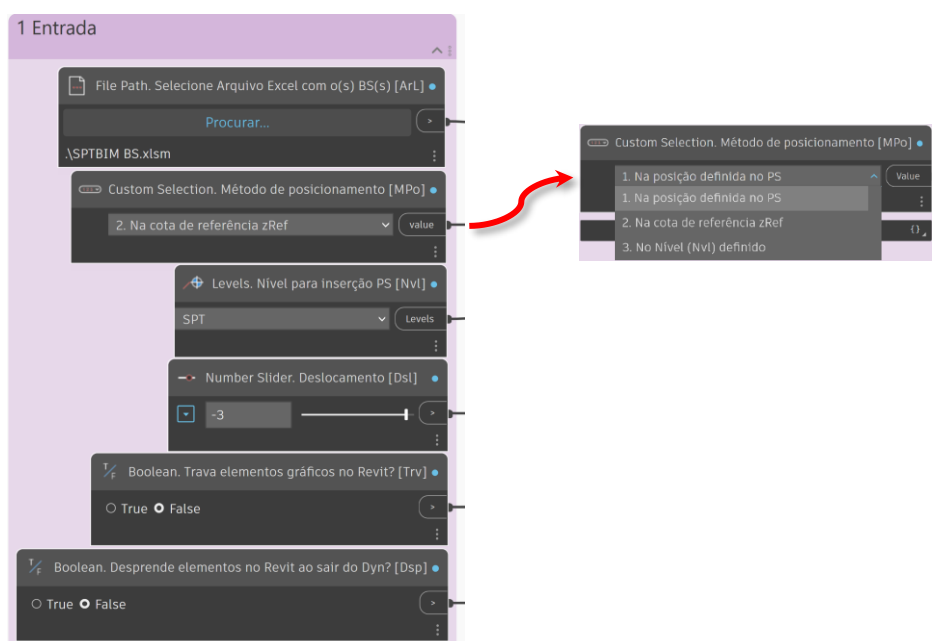


Figura 8 – Seleção do arquivo Excel correspondente ao BS

2. Na cota de referência $zRef$.
A instância SPTBIM PS será inserida nas coordenadas de referência $xRef, yRef, zRef$, conforme definida no BS.
3. No nível (Nvl) definido.
A instância será inserida na altura 0,0, relativa à cota do nível existente no modelo *Revit* e definido pelo usuário.

Qualquer método definido para o posicionamento ainda sofrerá influência de um deslocamento (*Dsl*), cujo valor, no intervalo 0 (superfície do terreno) e -50m, com passo de 1, é definido através do nó *Number Slider*.

Eventualmente, deseja-se travar (ou “pinar”) os elementos gráficos correspondentes às representações geométricas das instâncias dos PS. Uma vez travado, os objetos relacionados não poderão ser movidos ou deletados, garantindo seu posicionamento no modelo. Se o nó *Boolean*. Trava elementos gráficos no *Revit* [*Trv*] é marcado com *True*, os objetos serão todos travados, podendo ser destravados no *Revit* através de comando próprio.

O *Dynamo* mantém os elementos que constituem as instâncias inseridas em sua memória. Ao sair do programa e retornar a processá-lo, os elementos estarão cativos, de forma que qualquer alteração terá implicação nos PS extraídos do BS. Caso deseja-se desabilitar a seleção, o nó *Boolean*. Desprende elementos no *Revit* ao sair do *Dyn* [*Dsp*] deverá ter o argumento *True* marcado.

Definido o arquivo *Excel*, o nó *Data.ImportExcel* (Grupo 2.1, Figura 9) realiza a leitura das informações obtidas da aba “*Revit*” (especificada em *SheetName*) da referida planilha, armazenando-as na forma de uma matriz linha x coluna (LxC). Todos os dados serão interpretados na forma de *string*. Por sua vez, o nó *List.Transpose* transformará a matriz para orientação coluna x linha (CxL), em conformidade com o padrão estabelecido na planilha.

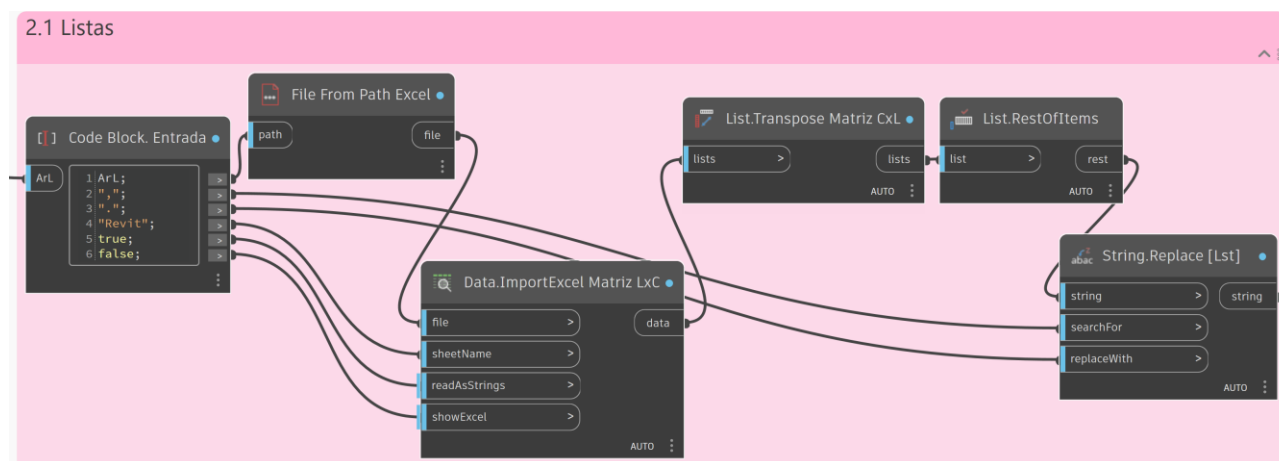


Figura 9 – Importação de dados da planilha Excel

Uma vez que o sistema de unidades do *Revit* permite o sistema adotado no Brasil (usando a vírgula como separador decimal), há que se trocar todas as ocorrências de “,” por ponto (se a planilha definir a vírgula como separador decimal), uma vez que o *Dynamo* apenas processa números decimais com separador por ponto. Esta operação é realizada pelo nó *String.Replace*, definindo a matriz de forma a reconhecer valores numéricos decimais.

Conhecida a lista *Lst*, proveniente da captura dos dados na planilha, o Grupo 2.2 (Figura 10) apresentará 4 listas específicas, com informações gerais (*DBj*, onde *j* é o índice correspondente aos PS especificados na planilha), os valores das camadas *k* de NSPT para cada um dos *PSj* (*NSPTj,k*), e a classificação textual de cada uma das camadas *k* (*CaCs,j,k*), às profundidades *CaPf,j,k* que definem o solo prospectado. Além dessas informações técnicas fundamentais, o Grupo ainda define o número de PS (*nPS*), na forma de um número inteiro; a lista *nNSPTj*, que define o número de camadas SPT do *PSj*; e a lista que define o número de camadas classificadas em cada PS (*nCa,j*).

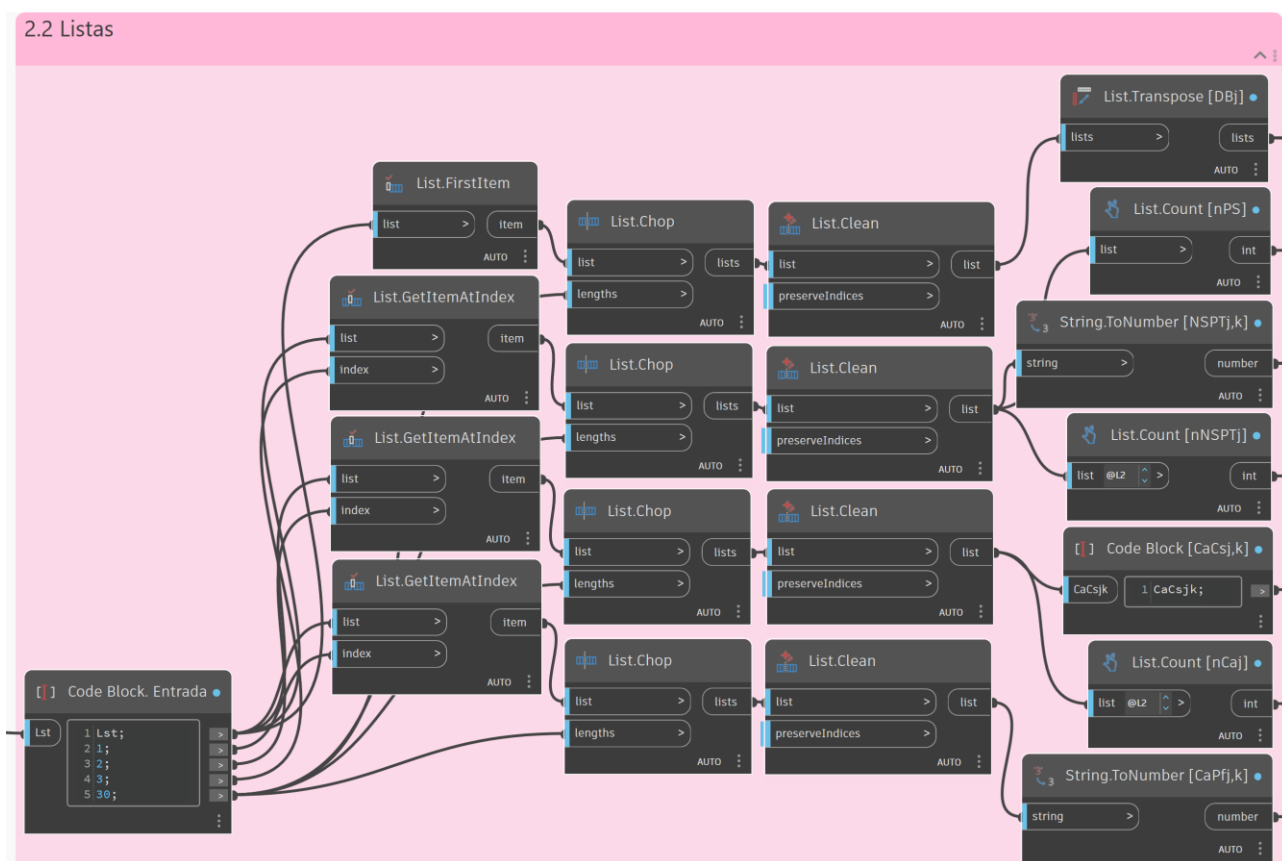


Figura 10 – Composição de listas específicas

Estas listas são compactadas, retirando, através do nó *List.Clean*, valores nulos e 0 que possam ser encontrados na planilha, quando nenhum valor é determinado em cada célula. A matriz original corresponde ao número de colunas populadas na aba da planilha e o número de linhas correspondente aos valores existentes. Assim, trata-se de matriz retangular. Uma vez que as colunas possuem comprimento não uniforme, há a ocorrência de valores nulos e “0”. Esses valores devem ser expurgados das listas.

3.3.2 Coordenadas para inserção dos PS

A lista *DBj* possui informações de coordenadas de referência (Ref) e dos PS, de forma que $PSj = PSRj + Ref$, expressa na forma de *x*, *y*, *z* (abscissa, ordenada e altura), para o ponto de referência, posicionada nas linhas 4, 5 e 6, e para o *PSRj*, posicionada às linhas 2, 3 e 7 (Grupo 3.1, Figura 11). O nó *List.GetItemAtIndex* permite capturar o elemento posicionado na linha *index* da lista indicada em *list*.

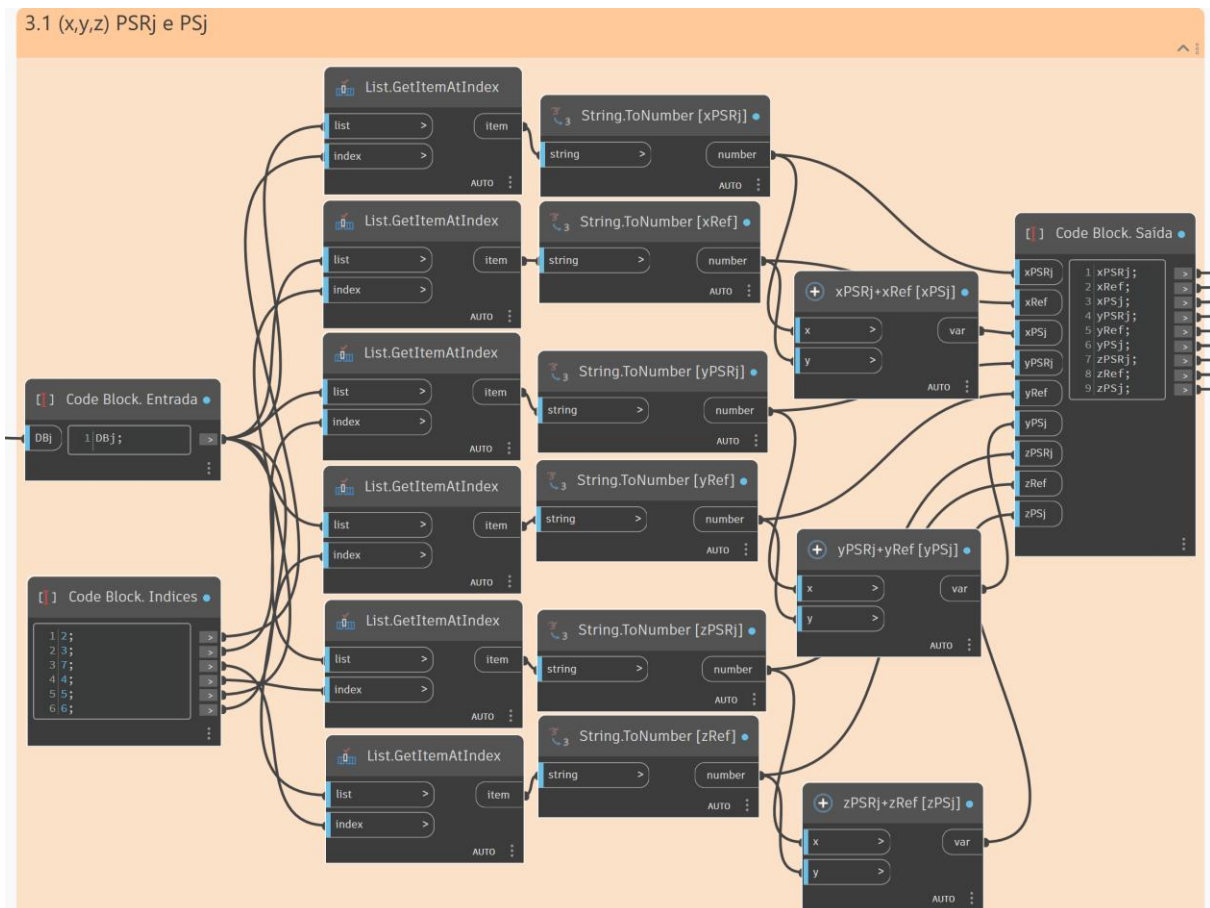


Figura 11 – Obtenção das coordenadas dos PSj

Os valores numéricos de $xPSRj$, $yPSRj$ e $zPSRj$ sofrerão ajustes por terem sido definidas em função de um ponto de referência. Assim, a tais valores serão somados $xRef$, $yRef$ e $zRef$, de forma que a soma será denominada $xPSj$, $yPSj$ e $zPSj$.

A Figura 12 apresenta um fluxograma, cujo código *Dynamo* correspondente é apresentado na Figura 13 (Grupo 3.2), no qual percebe-se que se o usuário deseja que a representação dos resultados da sondagem ocorra nas coordenadas definidas em planilha ($MPo=1$), ou seja, coordenadas do PS com base num ponto de referência, $zPSj = zPSRj + zRef$. Entretanto, se $MPo=2$ (usuário deseja que a família seja inserida no ponto de referência, $=zPSRj = zRef$). Caso contrário ($MPo=3$, quando se deseja a inserção da família no nível selecionado), $zPSj=0$.

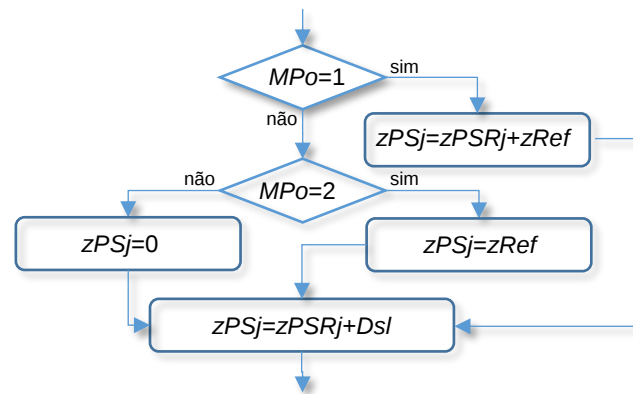


Figura 12 – Cálculo da altura z da instância, de acordo com MPo

Esse mecanismo permite que a representação dos PS seja posicionada na superfície do terreno ou (uma vez que se trata apenas de uma representação gráfica) abaixo do ponto de referência ou do nível selecionado, evitando, nesses casos, sobreposição dos os demais elementos que constituem o modelo. Além disso, a $zPSj$ será adicionado o valor do deslocamento (Dsl) atribuído pelo usuário: $zPSj = zPSj + Dsl$.

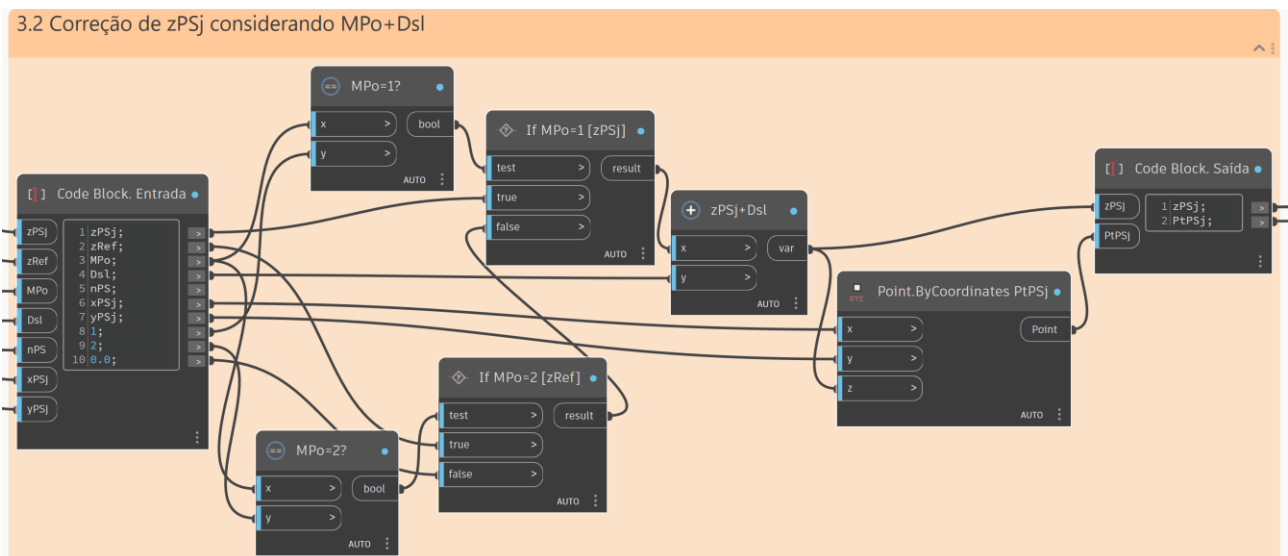


Figura 13 – Alteração de zPS em função das definições do usuário

Point.ByCoordinates compõe a lista de pontos $PtPSj$. Estes pontos correspondem à posição de inserção da instância de SPTBIM PS no espaço modelar do Revit, levando-se em consideração MPo e Dsl .

O valor da abscissa e da ordenada do ponto definido na planilha permanecem os mesmos, apenas com o índice PSR por comodidade de interpretação do programa. Tem-se, portanto, que todas as construções geométricas de cada PS terão como base as coordenadas (xPR , yPS , zPS) j .

3.3.3 Inserção de instâncias de SPTBIM PS

A representação geométrica do PS poderá, então, ser inserida no modelo em *PtPSj* através das operações definidas no Grupo 4.1, ilustrado na Figura 14. O nó *FamilyInstance.ByPointAndLevel* conduz a inserção da instância definida por *familyType* nas coordenadas definidas em *point*, relativas ao nível *Level*. O resultado será o identificador interno da instância (*Faln*), definida na variável *FamilyInstance*. Observa-se que a família SPTBIM.rfa deverá ter sido previamente carregada no modelo *Revit*. A Hipótese em contrário resultará no não funcionamento do algoritmo.

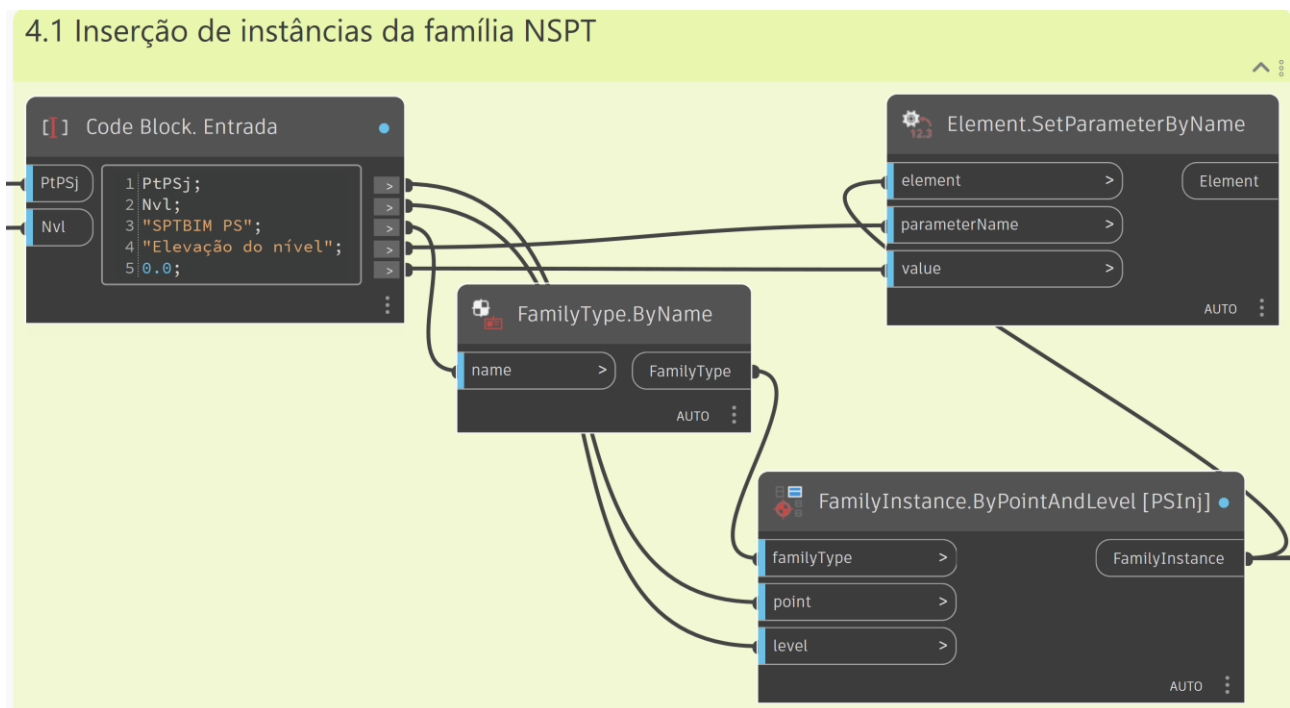


Figura 14 – Insere família nas coordenadas iniciais

3.3.4 Atribuição de valores aos parâmetros da instância

O Grupo 4.2 (Figura 15) tem o objetivo de, conhecidos os valores de $xPSRj$, $yPSRj$, $zPSRj$ e *Nome do Ponto de Sondagem* (este posicionado na posição 1 da lista *DBj*), inseri-los nos parâmetros pertinentes de cada instância da família. Os valores serão armazenados na instância exatamente como encontrados no BS.

O nó `List.SetParameterByName`, em diversas ocorrências, permitirá que um determinado valor (*value*) seja atribuído ao parâmetro *parameterName* da instância definida em *element*, definido pelo resultado da aplicação de *FamilyInstance.ByPointAndLevel*. Os valores de *parameterName* devem ser do tipo *string* e corresponder exatamente ao nome do parâmetro definido quando da composição da família, incluindo diferenciação entre caracteres maiúsculos, minúsculos e acentos. Da mesma forma, os valores devem corresponder, em tipo, exatamente àqueles definidos na composição da família.

O parâmetro **NSPT** é uma lista de nNSPT strings. Para ser atribuída à instância, precisa ser reformatada para uma string única. O nó `String from Array` transforma a lista definida em array numa string única, enquadrado em colchetes (cada sublista enquadrada em novo par de colchetes) e separados por vírgula. `String.Split` tem por objetivo dividir o string único em várias listas, separadas pelo `separator0`. Na sequência, retira-se os colchetes de cada string e assim, tem-se a lista de elementos (separados por vírgula), para cada **PSj** (Grupo 4.3, Figura 16).

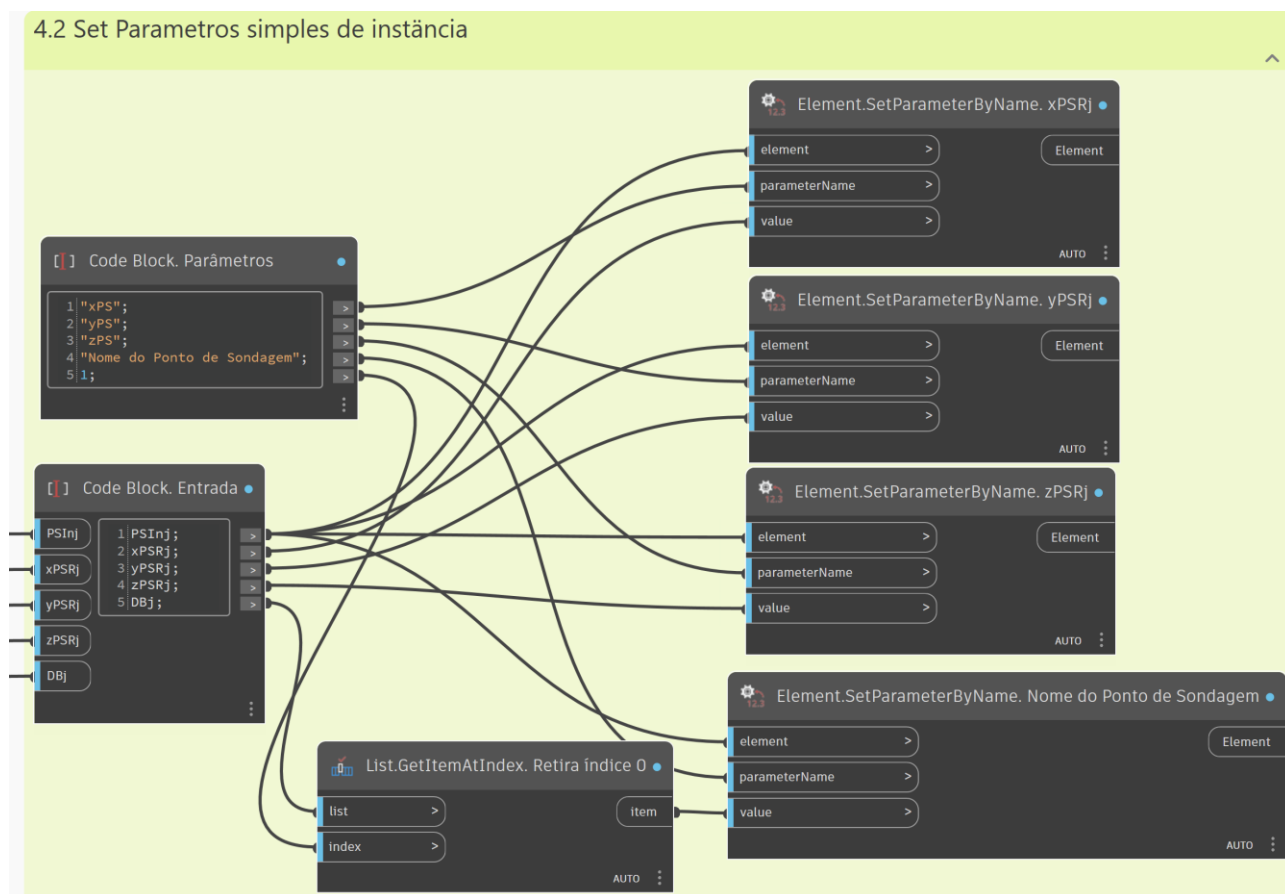


Figura 15 – Definição de Nome do furo e Número do relatório

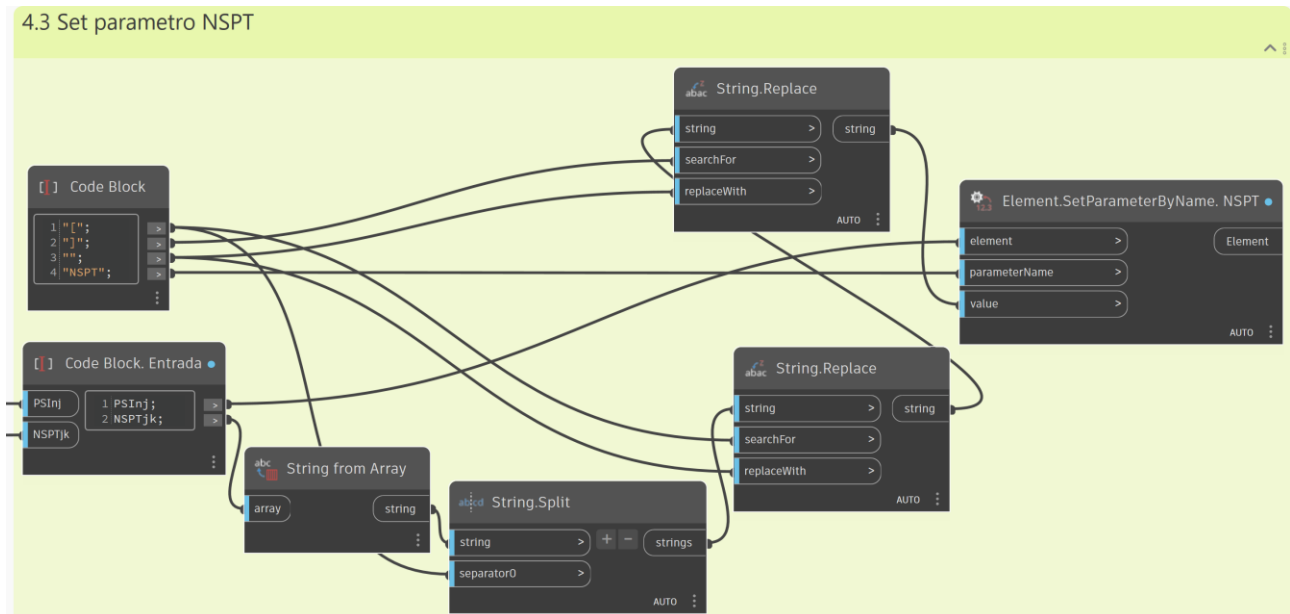


Figura 16 – Parâmetro NSPT

Os parâmetros de instância *Profundidade das camadas* e *Classificação do solo* serão populados, através de *Element.SetParameterByName*, da mesma forma que NSPT, transformando a lista de *string* em *string* único com os elementos constituintes separados por vírgula (Grupo 4.4, Figura 17).

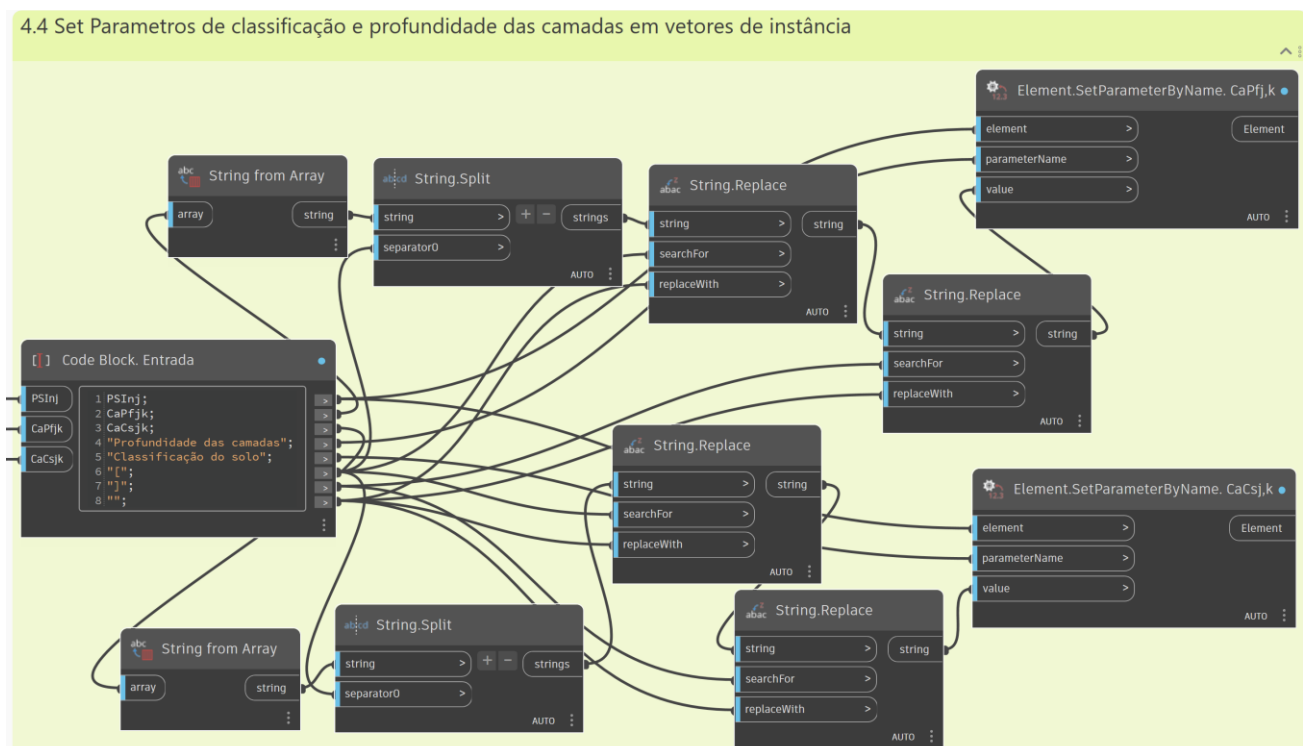


Figura 17 – Parâmetros de classificação do solo

Por se tratarem de parâmetros de tipo, os valores de *xRef*, *yRef*, *zRef*, e *Número do relatório* foram atribuídos através do nó externo *Elements.SetParameterByNameTypeOrInstance*, contida no pacote gratuito *Rhythm*.

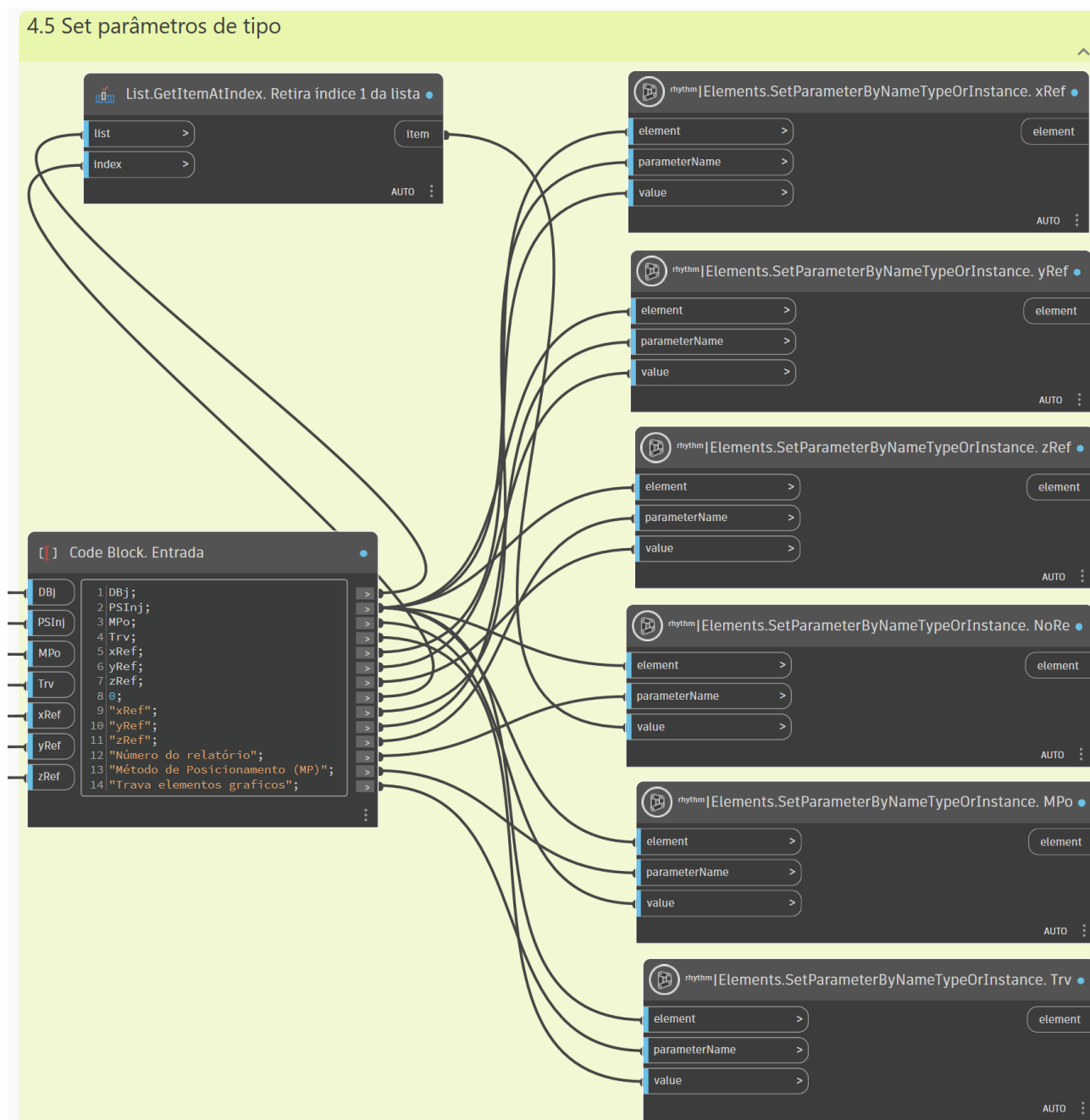


Figura 18 – Atualização dos parâmetros de tipo

3.3.5 Representação gráfica

Optou-se por representar graficamente os valores de $NSPT$, da estratigrafia e do nível d'água. A Figura 19 apresenta o aspecto final da representação. Observe os dois semianéis concordando, formando um cilindro. Em verde, os $NSPT$ e em marrom, as espessuras dos solos classificados.

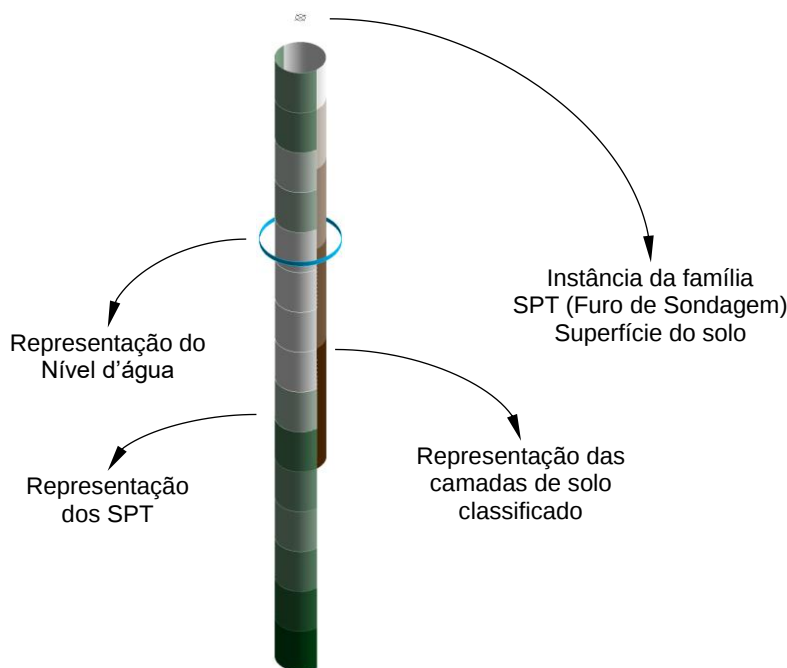


Figura 19 – Representação do ponto de Sondagem

3.3.6 Representação gráfica do SPT

Essa representação consiste na sucessão de semicilindros de 1m de altura, colorida em tons de verde, de acordo com os valores provenientes do BS. Conhecidos xPS_j , yPS_j , zPS_j do ponto que posiciona o PS_j , definiu-se uma lista das coordenadas do ponto de base de cada um dos semianéis k de representação do $NSPT_j$ (Grupo 5.1, Figura 20). A saída do nó *Point.ByCoordinates* contém uma lista correspondente ao ponto central dos semianéis, cujos níveis são aqueles com intervalos de 1m a partir de zPS_j . Os valores de xPS e yPS se repetem ao longo da representação. O resultado é, portanto, uma lista $(xPS, yPS, zPS)_{j,k}$, sendo k o índice da camada de $NSPT$, no intervalo 0 a $-nNSPT$.

Com base nessas coordenadas, utilizou-se o nó *Arc.ByCenterPointRadiusAngle* com o objetivo de inserir um número de arcos correspondentes a $nNSPT$, cujos raios são fixados em 0,5 m, ângulo inicial em 0° e final, 180° (semicírculo). Cada um desses arcos foram extrudados à altura de 1m, ao longo do eixo z , através do nó *Curve.Extrude*, e importados para o Revit através de *ImportInstance.ByGeometry*. Como resultado, tem-se no Revit, um conjunto de semiarcos sobrepostos, equidistantes de 1m.

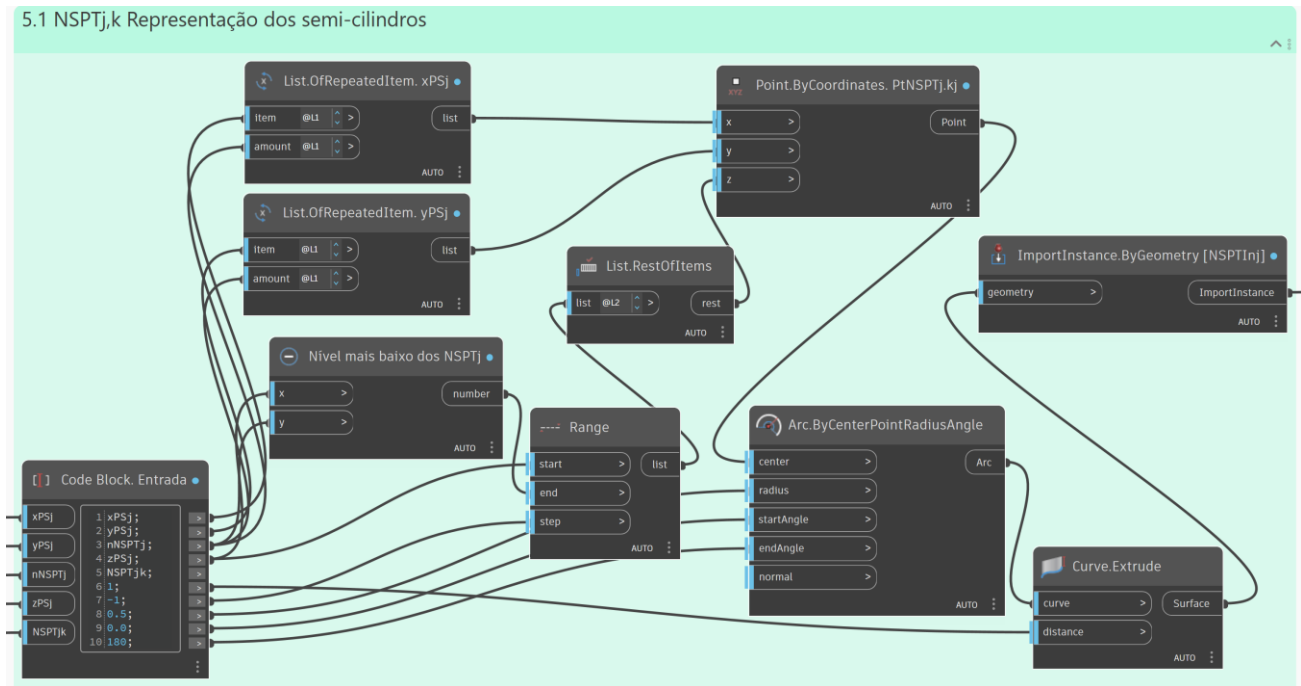


Figura 20 – Coordenadas da base de cada camada SPT

Uma vez modelados os semianéis, sem caracterização de material e, portanto, sem cor definida, estabeleceu-se um critério de faixa de cores para representar, visualmente, uma escala de intensidade do valor do NSPT. Quanto mais clara a cor (no caso mostrado na programação, branca (), menor a resistência à penetração, enquanto que a cor mais escura (), maior. A Figura 21A ilustra um grupo de semicilindros de representação de 15 camadas de NSPT, sem o código de cores. Em B, a mesma representação, agora com as colorações supracitadas. No exemplo dado, à profundidade - 6 m tem-se o menor valor de NSPT 7 (Figura 21C) e em - 15 m, o maior (32).

O Grupo 5.2 (Figura 22) apresenta algoritmo para a definição do intervalo de cores a ser atribuído aos semicilindros de representação do SPT. O nó *Color Range* permite a construção de uma lista de cores no intervalo branco e verde, aplicado aos semicilindros. *Element.OverrideColorInView* aplica a cor no semicilindro gerado, de acordo com o valor correspondente a cada NSPT, cuja saída poderá ser referenciada (*NSPTIn*) como objeto definido na área de trabalho do Revit.

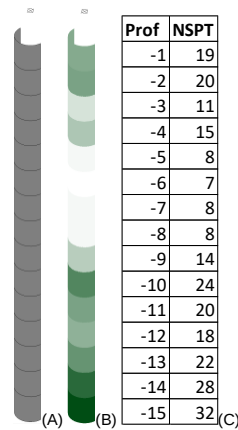


Figura 21 – Código de cores de representação dos semicilindros dos NSPT

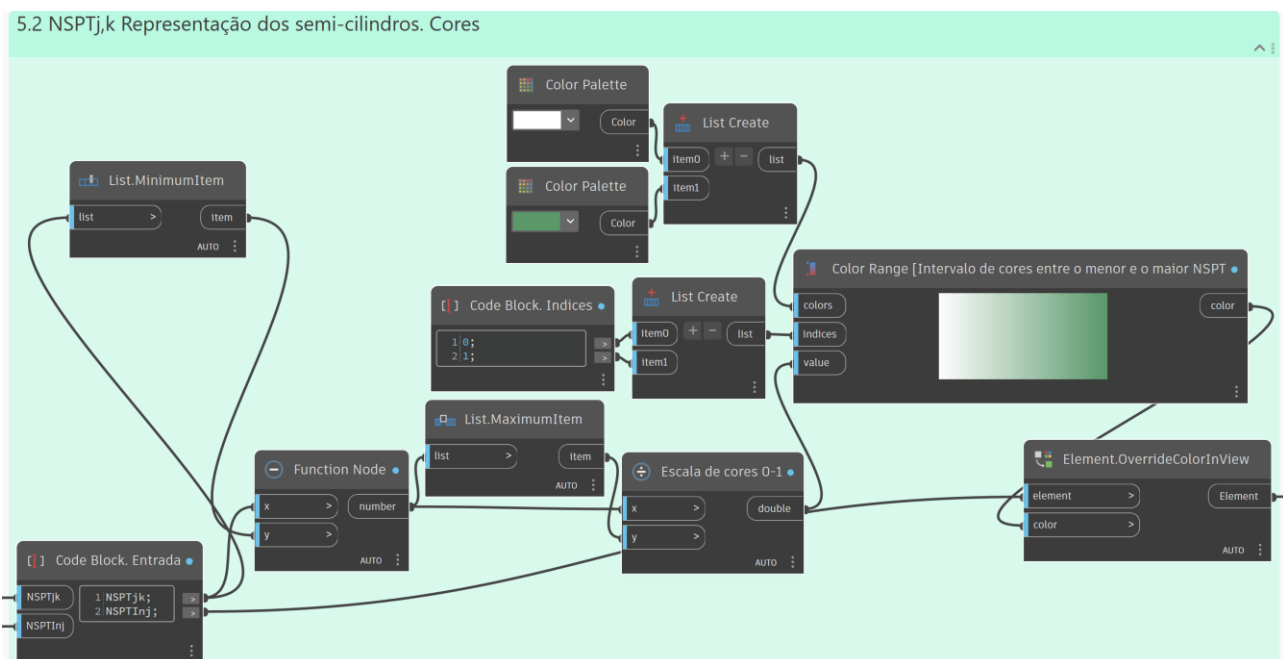


Figura 22 – Atribuição de cores aos anéis SPT

3.3.7 Representação gráfica das camadas de solo

A lista Cota da *profundidade das camadas*, expressa por zCA_j , definida pela diferença entre a cota zPS_j e a profundidade da camada k ($CaPf_{jk}$), constitui uma lista de j pontos de sondagem x k camadas. O Grupo 6.1, ilustrado na Figura 23, calcula e apresenta como variáveis de saída a espessura ($CaEs_{j,k}$) e a cota de fundo (zCA_j) de cada uma das camadas de solo.

6.1 Camadas Representação dos semi-cilindros

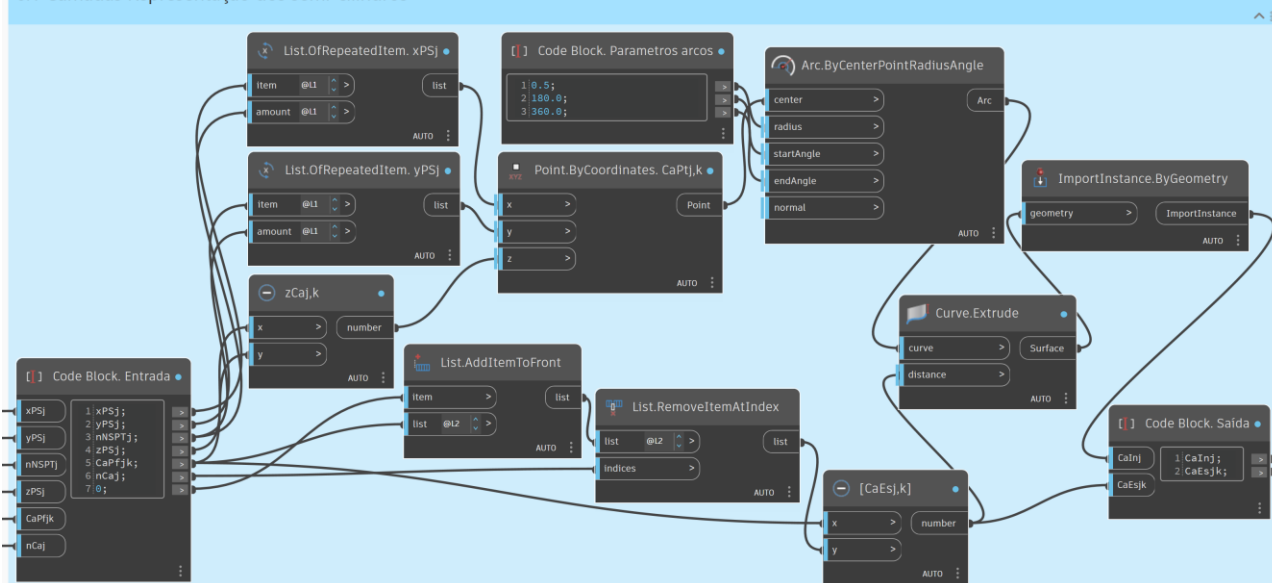


Figura 23 – Definição da espessura e cota de fundo das camadas de solo

A estratificação do solo será representada por um conjunto de semicilindros de alturas correspondentes à espessura da camada observada no BS. Assim, a partir das coordenadas de fundo das camadas, dadas pelos nós *Point.ByCoordinates*, e suas espessuras, modela-se os semicilindros representativos das camadas. O centro dos arcos corresponde às coordenadas de fundo das camadas, com raio=0,5m. O arco tem início no ângulo 180°, varrendo até 360°, completando o cilindro com aqueles de representação dos NSPT. Os arcos serão extrudados com altura corresponde à espessura de cada camada.

Semelhantemente ao grupo ilustrado na Figura 21, cada camada de solo, representado por um conjunto de semicilindros, terá uma cor representativa de sua espessura. A cor branca () representa a menor espessura de camada, e a camada mais espessa, cor marrom: (). Espessuras intermediárias terão cor proporcional no espectro entre o branco e o marrom. O nó *Element.OverrideColorInView* atualiza a cor de cada camada no *Revit*, (Grupo 6.2, Figura 24).

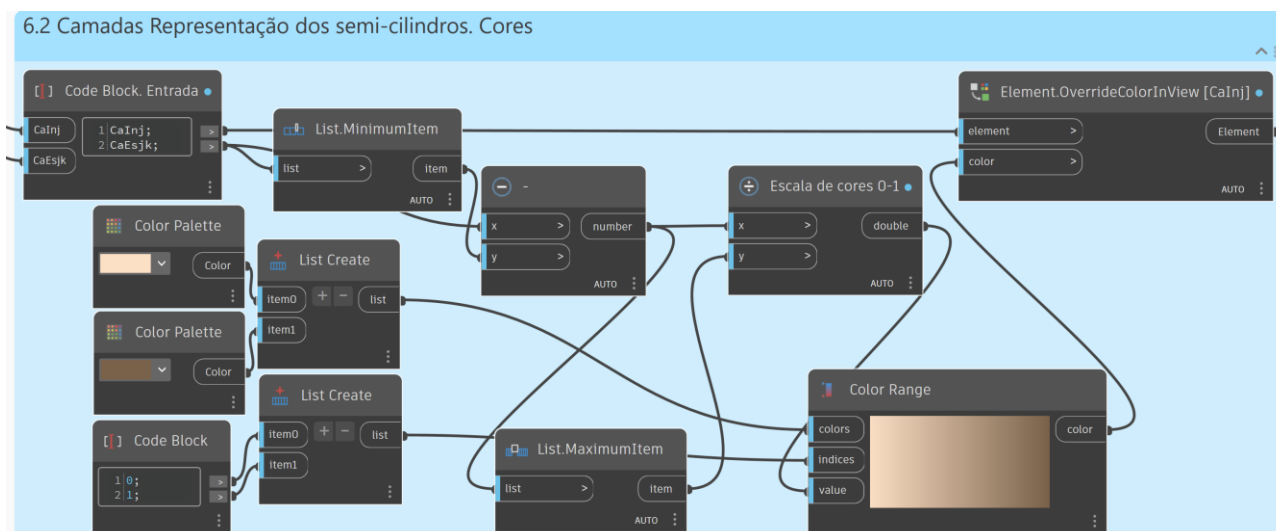


Figura 24 – Implementação do código de cores na representação das camadas

A Figura 25A ilustra uma representação de espessura de camadas de solo sem o tratamento de cores, onde se vê 5 semicilindros com alturas apresentadas na Figura 25C. Cada qual correspondente a uma camada, cuja espessura é definida no BS. O tratamento de código de cores é mostrado na Figura 25B, para os valores de espessura definidos na Figura 25C. Observe os tons de marrom correspondente a espessura de 1m e 3m.

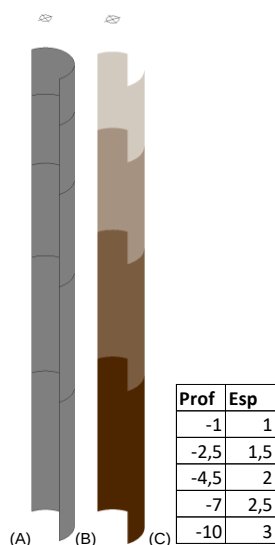


Figura 25 – Código de cores para a representação da espessura das camadas

3.3.8 Representação do semicilindro do Nível d'água

O Grupo 7, ilustrado na Figura 26, ilustra o algoritmo para a captura do valor correspondente à profundidade do Nível d'Água (posição 9 da lista *DBj*). A cota de representação do NA (*zNAj*), correspondente à diferença entre *zPSj* e *Profundidade do NAj*. O valor do primeiro tem propósito na sua representação geométrica, enquanto o segundo, será inserido no parâmetro *Nível d'água* da família.

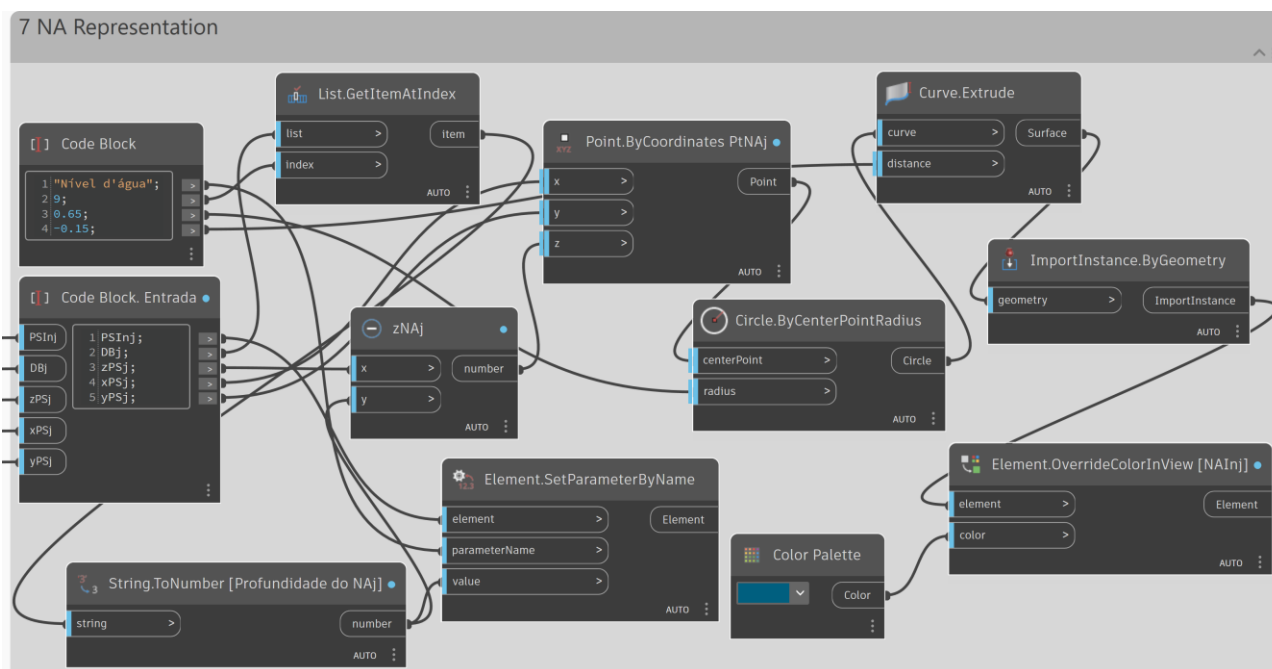


Figura 26 – Profundidade e cota do nível d'água

Com *zNAj*, bem como *xPSj* e *yPSj*, estabelece-se o ponto central do cilindro de representação geométrica, definido por *Point.ByCoordinates*. Este será o centro do círculo de raio pré-estabelecido de 0,65 m, definido por *Circle.ByCenterPointRadius*, extrudado à altura de - 0,15 m (valor negativo, indicando extrusão no sentido centro da terra), através do *Curve.Extrude*. O resultado será exportado para o *Revit* através de *ImportInstance.ByGeometry*. O nó *Element.OverrideColorInView [NAIn]* permite ao usuário aplicar a cor azul ao cilindro gerado, cujo elemento *Revit* é identificado como *NAIn*.

A instância de SPTBIM PS estará sempre atrelada ao código *Dynamo*, de forma que se selecionando nova planilha de relatório de sondagem, os dados gerados pelo programa serão atualizados para a instância do modelo. O pacote adicional (gratuito) *Rythm* possui o nó *Helpers.ToggleElementBinder*, que tem a função de liberar a instância do código. A Figura 27 ilustra como aplicar a ferramenta. Ocorre a necessidade, entretanto, de garantir que o *Dynamo* possua instalado o pacote citado. Além disso, todas os objetos gráficos que representam o furo poderão ser bloqueados contra alterações de posição e remoção através do nó *Element.SetPinnedStatus*.

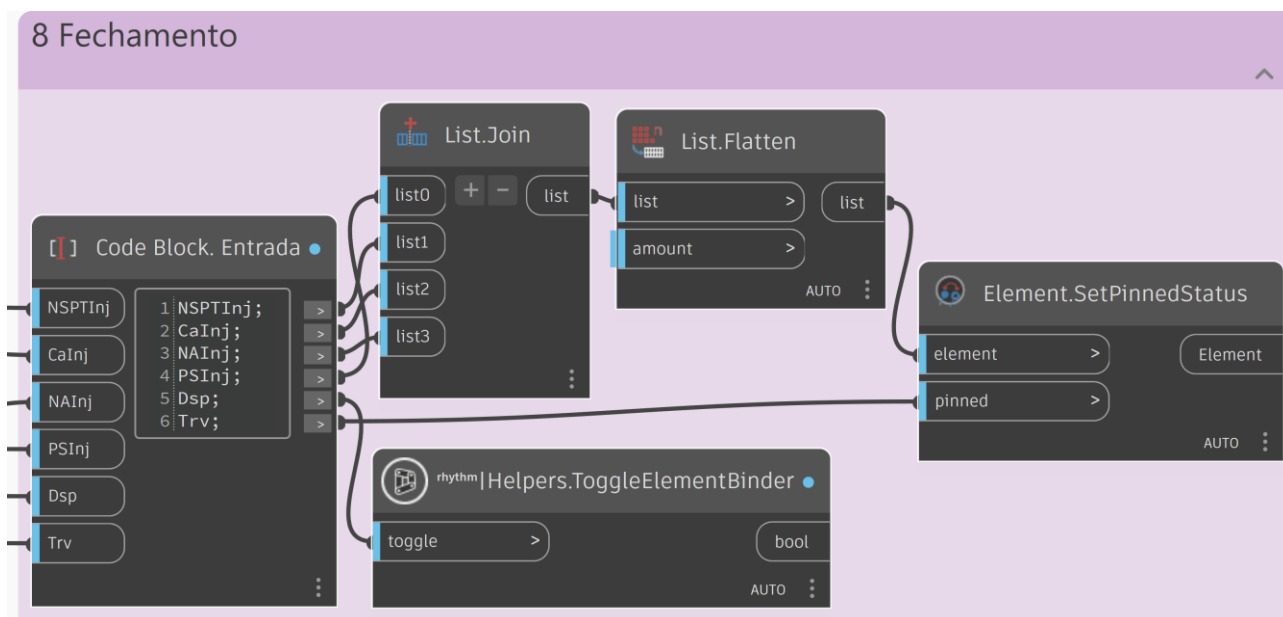


Figura 27 – Mecanismo para liberar SPT (Furo de Sondagem) do código Dynamo

A Figura 28 ilustra o aspecto geral do código Dynamo para implementação do *SPTBIMInsert*. As posições relativas dos Grupos podem não corresponder ao que é mostrado na figura, uma vez tratar-se de localizações aleatórias.

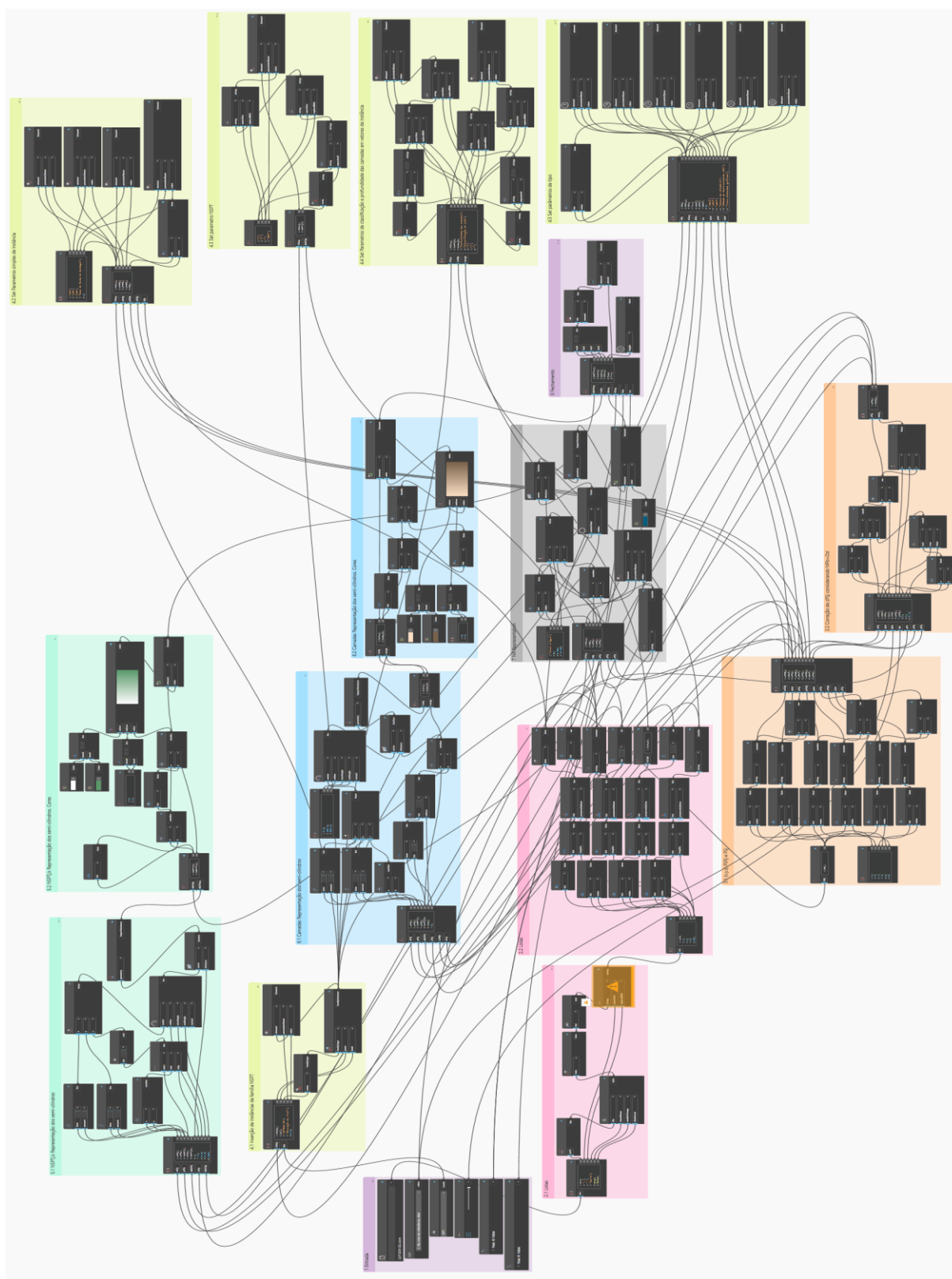


Figura 28 – Aspecto geral do código Dynamo de SPTBIMInsert

3.4 INTERPOLAÇÃO DE SONDAGEM SPT

A sondagem do solo é normalmente efetuada em alguns pontos do terreno, previamente determinada por profissional qualificado e, em boa parte das vezes, não correspondem (nem em número e nem em posição) aos pontos de aplicação da carga normal a ser transmitida aos elementos de fundação. Comumente, portanto, ocorre a necessidade de decidir sobre que valores adotar, quando os ensaios foram realizados a certa distância do ponto de aplicação da carga.

O algoritmo *Dynamo* denominado *SPTInterpol* tem por objetivo estimar, por métodos de interpolação, valores típicos de um levantamento geotécnico em pontos de referência a serem determinados.

3.4.1 Dados de entrada

O Grupo 1, apresentado na Figura 29, contém um conjunto de nós com o objetivo de selecionar objetos de referência na área modelar do *Revit* e definir informações para a realização das interpolações necessárias, com base em suas posições.

O nó *Select Model Elements* permite ao usuário selecionar um grupo de objetos sob os quais serão inseridas instâncias da *SPTBIM* (tipo *SPTBIM PA*), com valores de cotas, NSPT e NA interpolados, conforme o método definido em *Método de interpolação (MI)*. Por exemplo, podem ser selecionados pilares de uma Obra de Arte Especial (OAE), sob os quais, deseja-se estimar o espectro SPT e NA. O grupo também permite definir o MI, através do nó *Custom Selection*, permitindo a escolha de um dos quatro métodos propostos neste trabalho, aquele mais apropriado para a aplicação na engenharia de fundações.

Define-se, ainda, o *Expoente de ponderação*, correspondente à variável p da Equação 1, para aplicação no método de interpolação $MI = 1$. Quanto maior p , maior será a influência da proximidade entre os PA (Ponto de Análise, correspondente ao ponto de inserção dos objetos de referência selecionados) e os PS na interpolação. Normalmente e para casos usuais, utiliza-se $p = 2$.

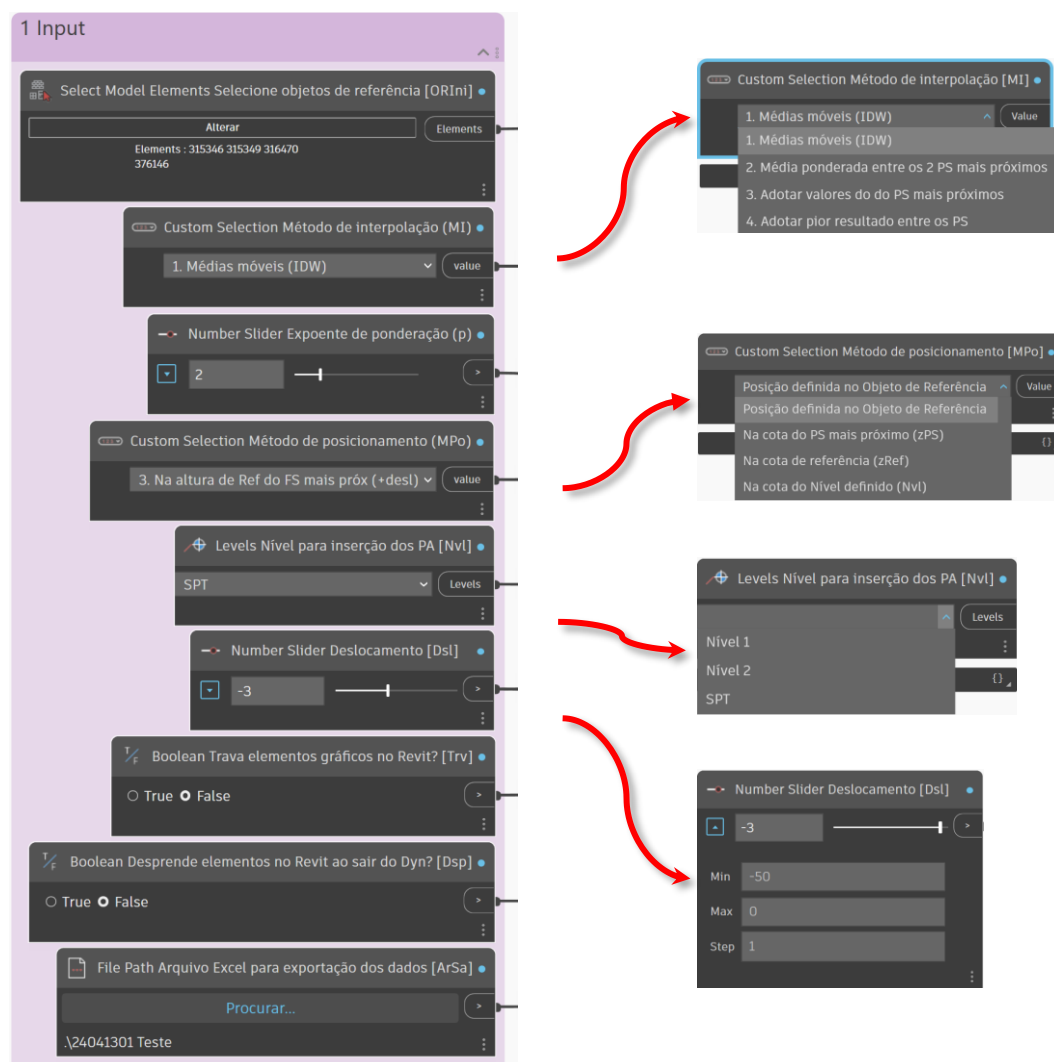


Figura 29 – Entrada de dados e configurações gerais

Da mesma forma que no SPTBIM PS, o Nível (*Nvl*) para inserção dos PA e o Método de posicionamento (*MPo*) darão ao usuário a oportunidade de escolher a posição vertical relativa para a inserção das representações geométricas das instâncias correspondentes. O nó *Level* lista todos os níveis definidos no modelo *Revit* corrente, permitindo a seleção de um pelo usuário. Recomenda-se que as variáveis assumam os mesmos valores que quando da inserção do relatório de sondagem (*SPTInsert*), não sendo esta uma exigência.

O recurso *Number Slider Deslocamento (Dsl)* permite que seja definida, de forma livre, um deslocamento (variando de 0 a – 50 m) para posicionamento vertical dos itens de representação gráfica de todos os PA. Trata-se de um mecanismo adicional de posicionamento para maior controle do usuário. O algoritmo ainda solicita um nome de arquivo *Excel* para que os dados levantados, tanto aqueles provenientes do boletim de sondagem, quanto aos pontos interpolados, sejam salvos em arquivo para posterior consulta por outro programa.

O Grupo 2.1, ilustrado na Figura 30, apresenta o algoritmo para capturar as coordenadas dos PSR_j , conforme indicados no relatório de sondagem, correspondentes à instância SPTBIM PS.

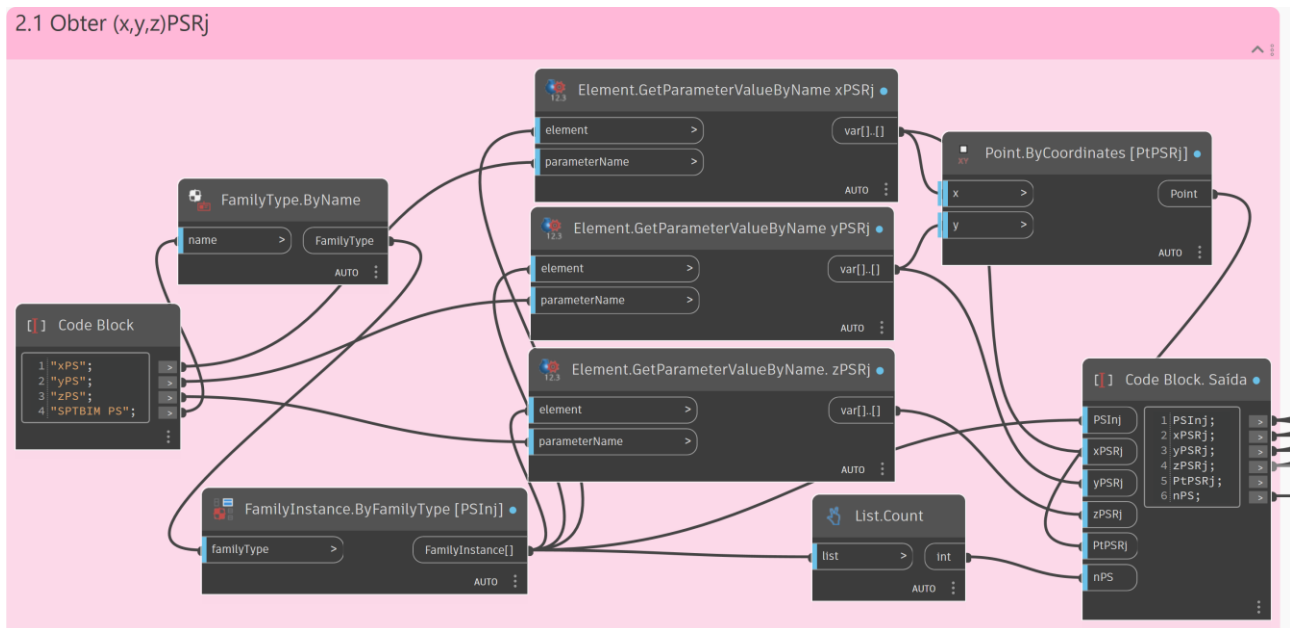


Figura 30 – Captura das instâncias dos PSj e suas coordenadas

Tais coordenadas são referenciadas e, por isso, deverão ser adequadas ao ambiente modelar do *Revit*. O Grupo 2.2, ilustrado na Figura 31, apresenta o algoritmo que busca as coordenadas de referência $xRef$, $yRef$ e $zRef$ e o deslocamento ($DslPS$) utilizado quando da utilização de *SPTInsert*, para recompor seus valores. Tem-se, portanto, que $xPSj = xPSRj + xRef$, $yPSj = yPSRj + yRef$, e $zPSj = zPSRj + zRef + DslPS$. Utilizou-se o nó *Elements.GetParameterValueTypeOrInstance* (do pacote *Rhythm*) para a captura dos parâmetros de tipo. Com $xPSj$ e $yPSj$, compõe-se o ponto $PtPSj$, em projeção no plano à altura 0.

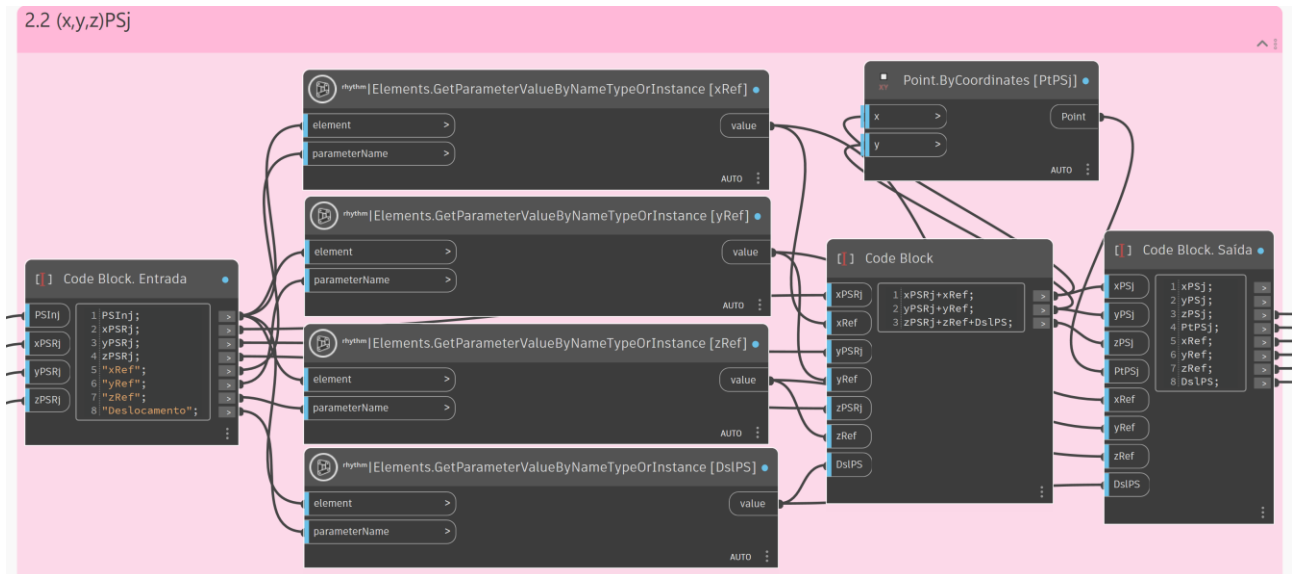


Figura 31 – Recomposição das coordenadas de PSj

As demais propriedades de interesse de *SPTInterpol* são obtidas pelo algoritmo do grupo 2.3, ilustrado na Figura 32.

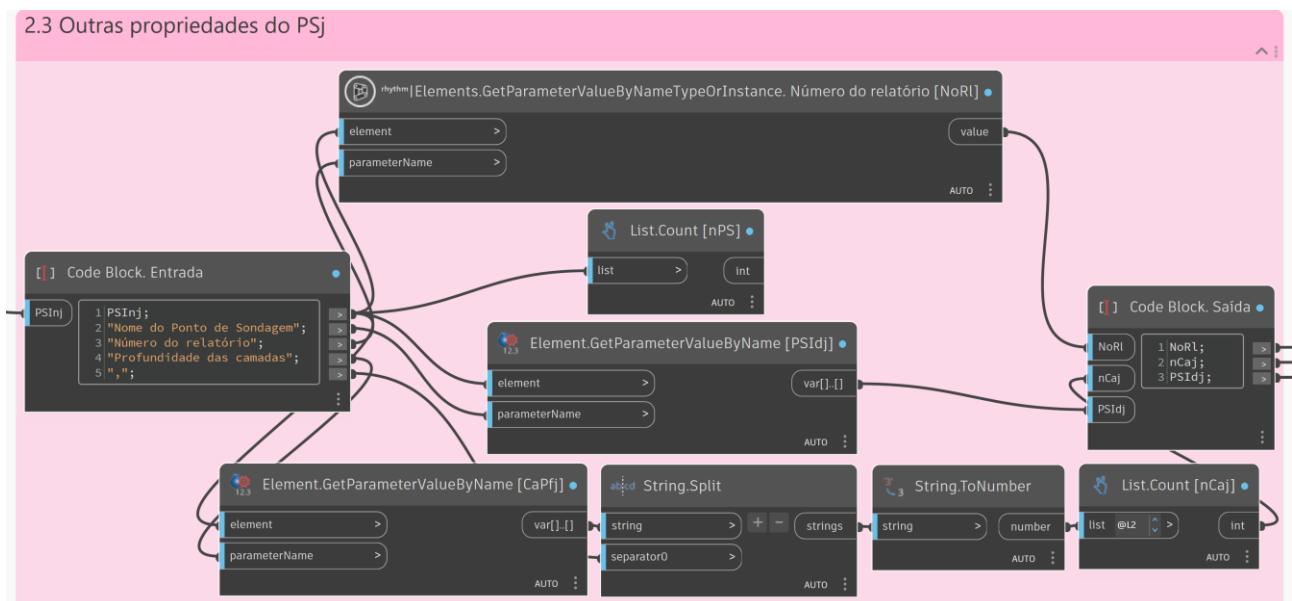


Figura 32 – Captura de propriedades adicionais de SPTBIM PS

Para efeito de melhor compreensão da natureza vetorial dos algoritmos contidos neste relatório, definiu-se a variável j para indicar o índice de posição dos PS. Assim, se *SPTInsert* acrescentou no modelo 3 pontos de sondagem, estes serão armazenados em listas, cujos índices variam de 0 ao número de furos - 1 (no caso supracitado, 0.2). Da mesma forma, definiu-se a variável i para indicar o índice de posição dos Pontos de Análise (PA) selecionados, e k para os índices das camadas NSPT e de estratificação do solo.

A posição do PSj , portanto, é obtida dos parâmetros $xPSj$, $yPSj$ e $zPSj$, uma vez que são aqueles originais, conforme definida quando da utilização de $SPTInsert$. Eventualmente, sua representação gráfica pode ter sido movida no modelo (especialmente a cota $zPSj$, função de MPo e Dsl). Capturando tais informações conforme atribuídas aos parâmetros, está garantida sua integridade, conforme documento comprobatório expresso na planilha *Excel* fornecida. Observa-se, entretanto, que $xPSj$, $yPSj$ e $zPSj$ são coordenadas dadas a partir de outras de referência ($xRef$, $yRef$, $zRef$). Assim, a coordenada de posicionamento do PSj é dada por $xPSj + xRef$, $yPSj + yRef$, $zPSj + zRef + Dsl$.

O nó *Point.ByCoordinates* compõe o objeto $PtPSj$, representando os pontos de inserção dos PSj num mesmo plano, bem como o número de instâncias encontradas (nPS) e seus identificadores internos ($PSInj$).

As instâncias de *SPTBIM PS*, previamente inseridas no modelo, contém informações a serem interpoladas: $zPSj$ – cota de superfície do PSj , $NSPTj,k$ – valores de NSPT correspondentes ao PSj , e $zNAj$ – Nível d'água do PSj . Elas descrevem o ponto de sondagem com suas características expressas no relatório contido em planilha específica.

Uma vez selecionados os objetos de referência, o Grupo 3, ilustrado na Figura 33, captura as coordenadas de inserção de cada um deles através do nó *Element.GetLocation*, cuja saída será a lista de ponto coordenado $PtPAi$ (com referência ao plano de altura 0), correspondente a cada um dos i elementos selecionados. O ponto é proveniente dos valores de $xPAi$ e $yPAi$, organizados em listas cujos comprimentos correspondem ao número de elementos selecionados (nPA). Assim, i varia de 0 a $nPA - 1$.

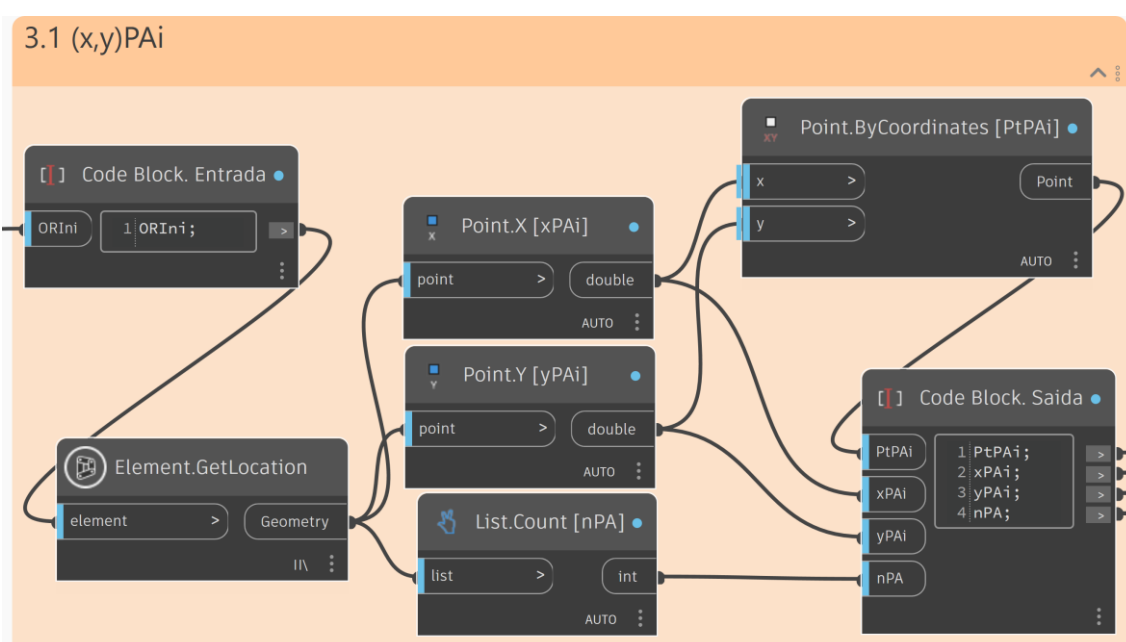


Figura 33 – Captura coordenadas dos PAi , cálculo de di,j e parâmetros

Através do algoritmo do Grupo 3.2 (Figura 34), calcula-se as distâncias entre os PA_i e os PS_j . Isto é realizado pelo nó *Geometry.DistanceTo*, onde *geometry* representa as coordenadas dos PA_i (representado por $PtPA_i$), e *other*, as dos PS_j ($PtPS_j$). O resultado é uma matriz $n_{PA} \times n_{PS}$, denominado di,j . Assim, para a combinação de 3 PS existentes e 4 pontos de análise, por exemplo, têm-se uma matriz de 12 elementos.

Math.Pow permite elevar o valor de di,j à potência p (definido anteriormente pelo usuário, Figura 29). Com di,j^p calcula-se o seu inverso. O nó $1/di,j^p$, portanto, corresponde à matriz da expressão aplicada a cada di,j . Obtém-se, na sequência, o somatório da expressão para cada PA. O resultado de *Math.Sum* é, portanto, uma lista de índice i , ou seja, o somatório do resultado da expressão para o PA aplicado a cada PS, e que corresponde ao numerador da Equação 1.

Os valores descritos no parágrafo anterior serão particularmente úteis às interpolações pelo $MI = 1$. Para outros métodos, também será útil conhecer quais PS são o primeiro e o segundo mais próximos de PA_i . $di,1$ é o valor correspondente à menor distância entre o PA_i e o PS_j , cujo índice na matriz di,j é dado por $indi,1$. Da mesma forma, $di,2$ é a segunda menor distância, cujo índice em di,j é dado por $indi,2$. A soma $di,1 + di,2$ também é provida no grupo.

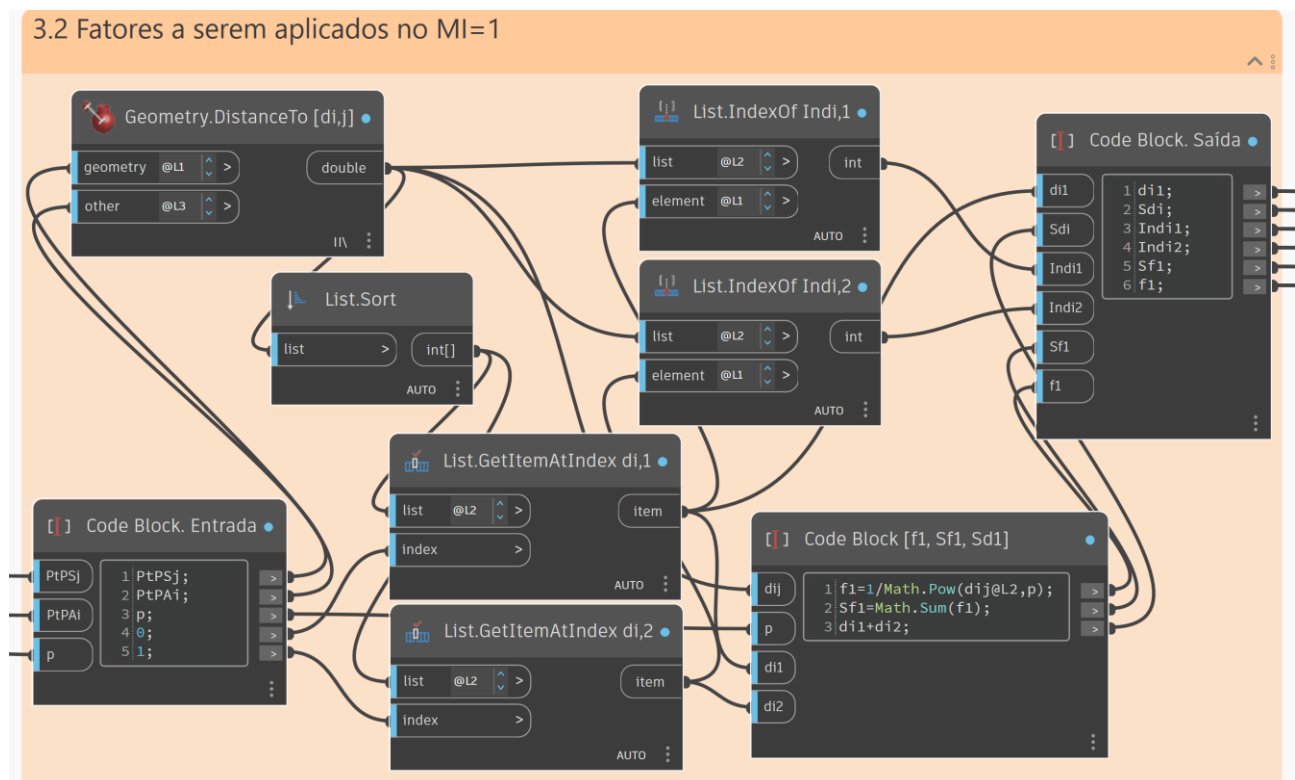


Figura 34 – Cálculo das distâncias entre PSj e PAi

3.4.2 Métodos de interpolação

Foram implementados 4 métodos de interpolação, que serão aplicados para estimar a cota superficial do terreno sob o PA_i (zPA_i), a lista com os resultados do SPT sob o ponto de inserção do PA_i ($NSPT_{i,k}$) e o nível d'água no mesmo ponto (zNA_i).

O método de interpolação 1 ($MI = 1$) é denominado Método da Média Móvel Ponderada (IDW), conhecido na Matemática. A Equação 1 apresenta a formulação adotada para interpolação de $\hat{Z}_i$, conhecidos Z_j . O valor de $\hat{Z}_i$ é, portanto, inversamente proporcional à sua distância $d_{i,j}$ elevada a uma potência p :

$$\hat{Z}_i = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_{i,j}^p} Z_j \right)}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_{i,j}^p} \right)} \quad (1)$$

Onde:

$\hat{Z}_i$ é o valor interpolado de cada Z_j no ponto de análise i , para o qual deseja-se uma aproximação;

$d_{i,j}$ é a distância entre o ponto de análise i e o ponto de sondagem j ;

p é o expoente de ponderação;

Z_j é o valor de cada Z nos pontos fornecidos j ; e

n é o número de pontos de análise utilizado no cálculo.

Os mesmos princípios estabelecidos na Equação 1 podem ser aplicados para a interpolação das cotas superficiais do terreno, SPT e o nível d'água. Alternativamente, pode-se interpolar valores de Z_j pela média ponderada dos dois pontos mais próximos ($MI=2$), aplicando-se a Equação 2.

$$\hat{Z}_i = \frac{(Z_2 - Z_1)d_1}{d_1 + d_2} \quad (2)$$

Onde:

Z_2/Z_1 são os valores limites fornecidos para interpolação; e

$d_{i,1/2}$ é a distância entre os pontos correspondentes a Z_2 e Z_1 .

dividida por S_{di} (previamente definidos, conforme Figura 30), e adicionada a $zPSj,1$. $zPAn$ poderá ser obtida também assumindo o valor da cota para o PSj mais próximo, o que consiste na aplicação do $MI = 3$. Para $MI = 4$, adota-se o valor mais baixo entre os $zPSj$.

O Grupo 4.2 (Figura 36), por sua vez, apresenta a lista $zPAn$ de comprimento nPA , cujo valor corresponde à cota de PAi , interpolado a partir do método definido MI .

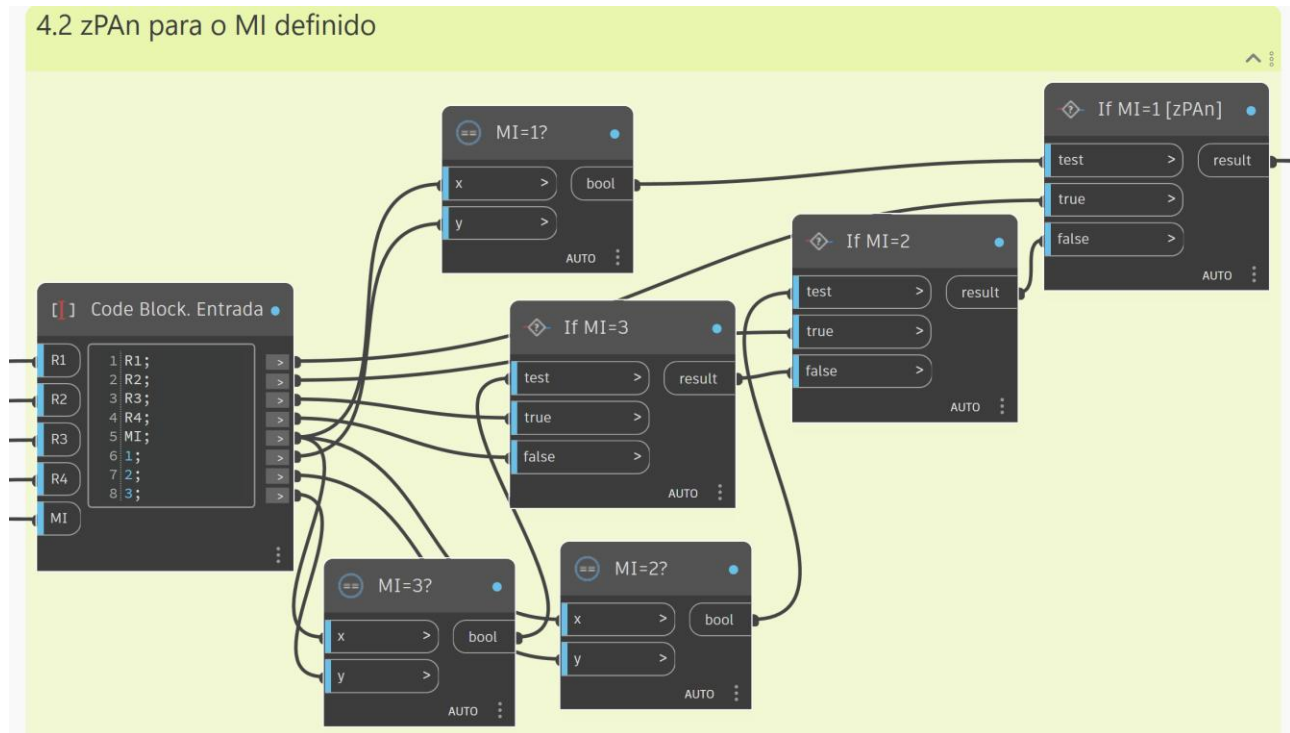


Figura 36 – Interpolação de $zPAi$ para o MI definido

Conhecido o valor da cota da superfície interpolada do terreno ($zPAn$), a cota geométrica para inserção da representação do BS ocorrerá à cota $zPAi$, levando-se em conta o método de posicionamento MPo e o deslocamento Dsl previamente definidos (Grupo 4.3, Figura 37). O Grupo também dispõe da cota interpolada de referência, $zPARi$, para fins de registro nos parâmetros da instância de $SPTBIM PA$.

Conhecidos $xPAi$, $yPAi$ e, agora, $zPAi$, tem-se o ponto de inserção do BS correspondente ao PAi ($PtPAi$). Esta variável será parâmetro de entrada *point* do nó *FamilyInstance.ByPointAndLevel*, acrescido de *familyType* e *Level*, caracterizado pelo nível definido Nvl . No Grupo 4.4 (Figura 38) é apresentado o algoritmo para a inserção da família, cuja variável é representada pelo parâmetro *FamilyInstance*.

4.3 zPAi com influência do MPo e Dsl

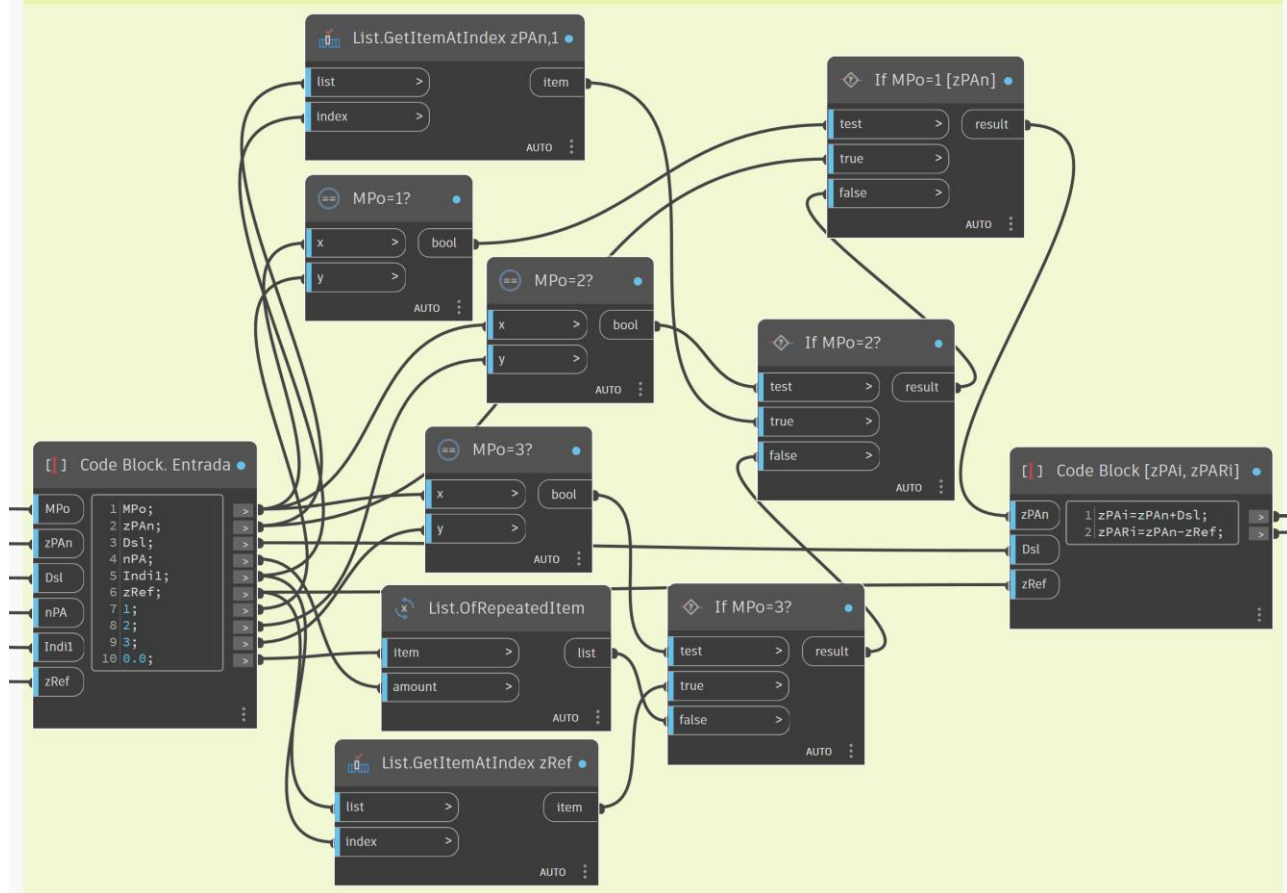


Figura 37 – Definição de zPAi, função de MPo e Dsl

4.4 Instanciação do PS interpolado no PAi

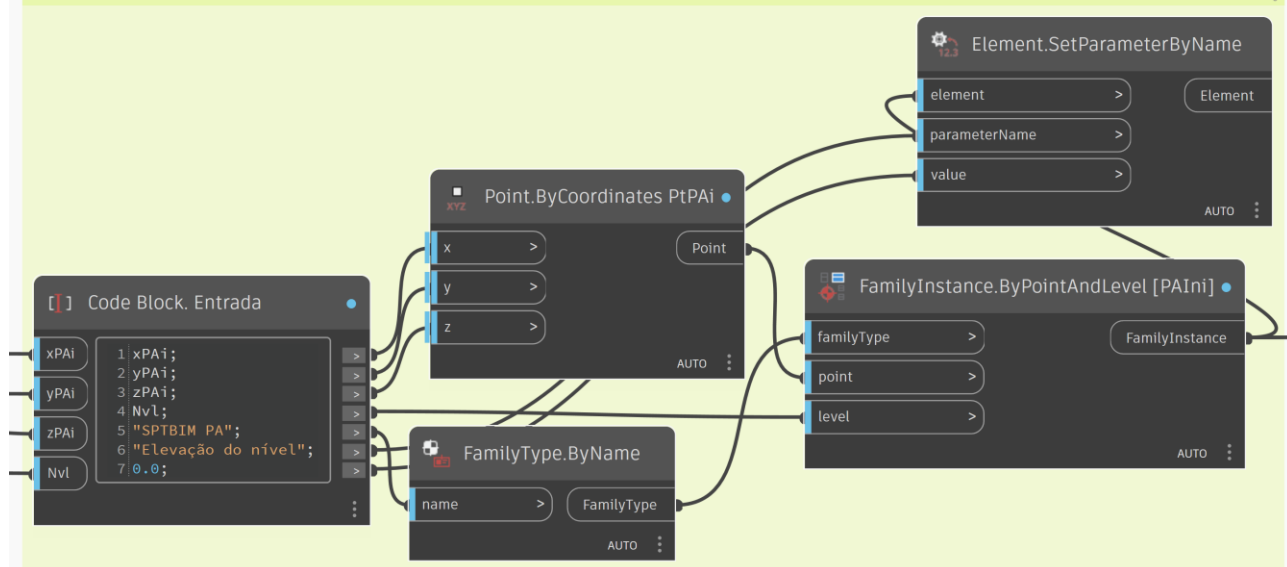


Figura 38 – Instanciação da família SPTBIM PA nos pontos de análise

3.4.4 Definição de $NSPT_{i,k}$ por interpolação

Os valores característicos de SPT para cada ponto de sondagem precisa ser interpolado para uma estimativa nos pontos de referência. Este procedimento é realizado através do código desenvolvido. O Grupo 5.1, ilustrado na Figura 39, tem por objetivo capturar os valores de $NSPT_j$, organizando-os numa matriz $j \times k$, valores esses já convertidos de strings para valores reais.

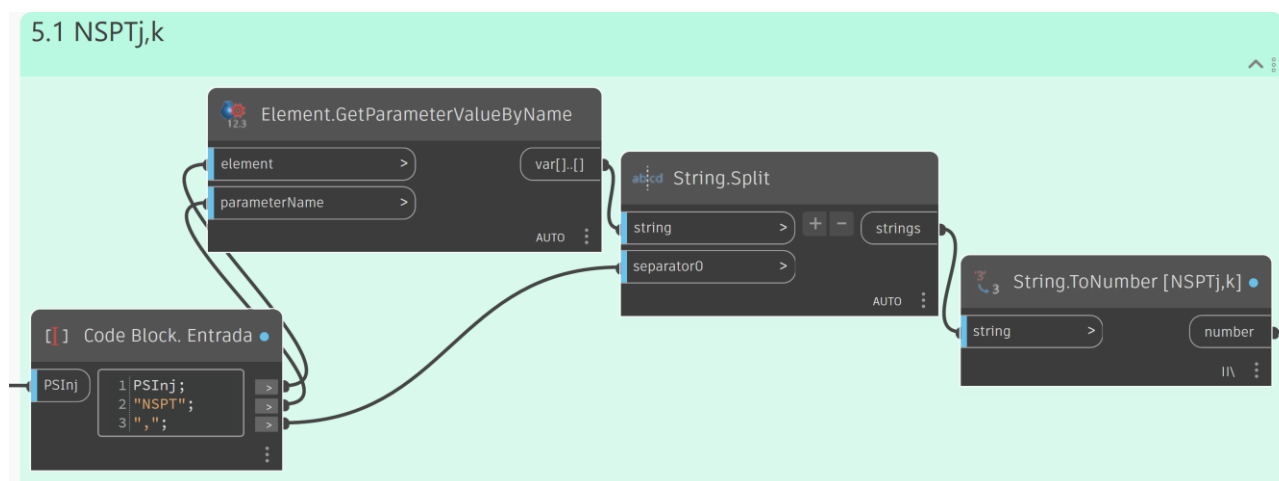


Figura 39 – Captura dos valores de $NSPT_{j,k}$

Uma vez que a lista $NSPT_{j,k}$ pode não ter comprimento uniforme, procedeu-se com a uniformização, tomando como base a lista $NSPT_{j,k}$ de maior comprimento. Aqueles eventualmente mais curtos terão o valor de fundo repetido até a posição de maior comprimento (Grupo 5.2, Figura 40).

Com $NSPT_{j,k}$, e de modo semelhante ao processo de interpolação de zPA_i , aplica-se os 4 métodos de interpolação para obtenção de $NSPT_{i,k}$. São interpolados cada um dos k níveis de investigação $NSPT_j$ (Grupo 5.3, Figura 41), considerando os 4 Métodos de Interpolação, cujos resultados são apresentados, respectivamente, nas variáveis $R1$, $R2$, $R3$ e $R4$. O Grupo 5.4 (Figura 42) apresenta o algoritmo que define $NSPT_{i,k}$, função do MI .

5.2 NSPTj,k

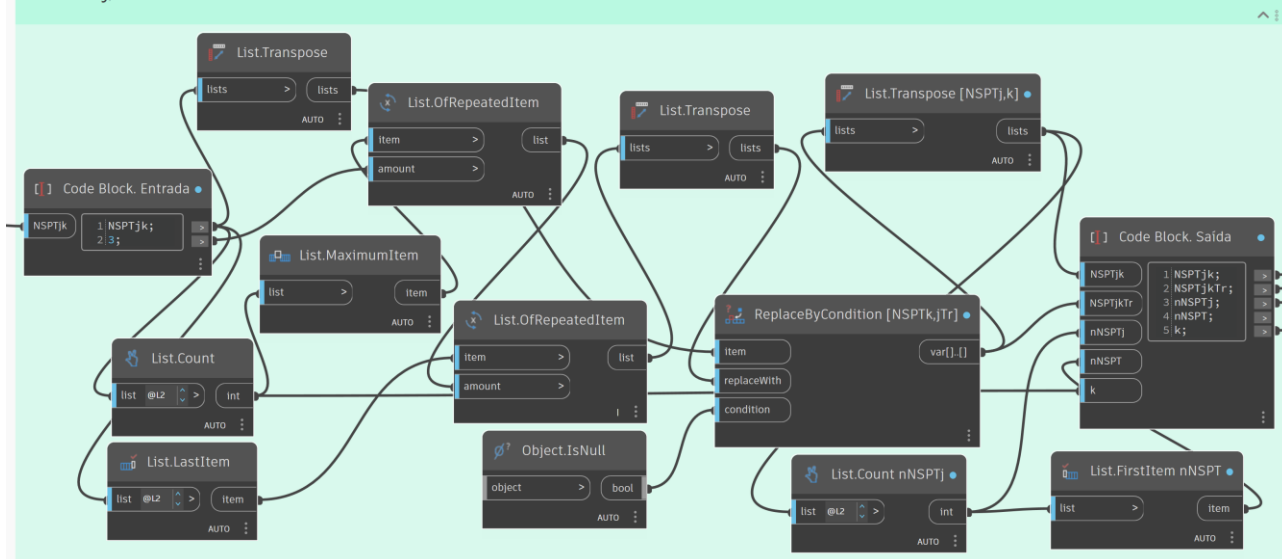


Figura 40 – Uniformização da matriz NSPTj,k

5.3 NSPTi,k para todos os MI

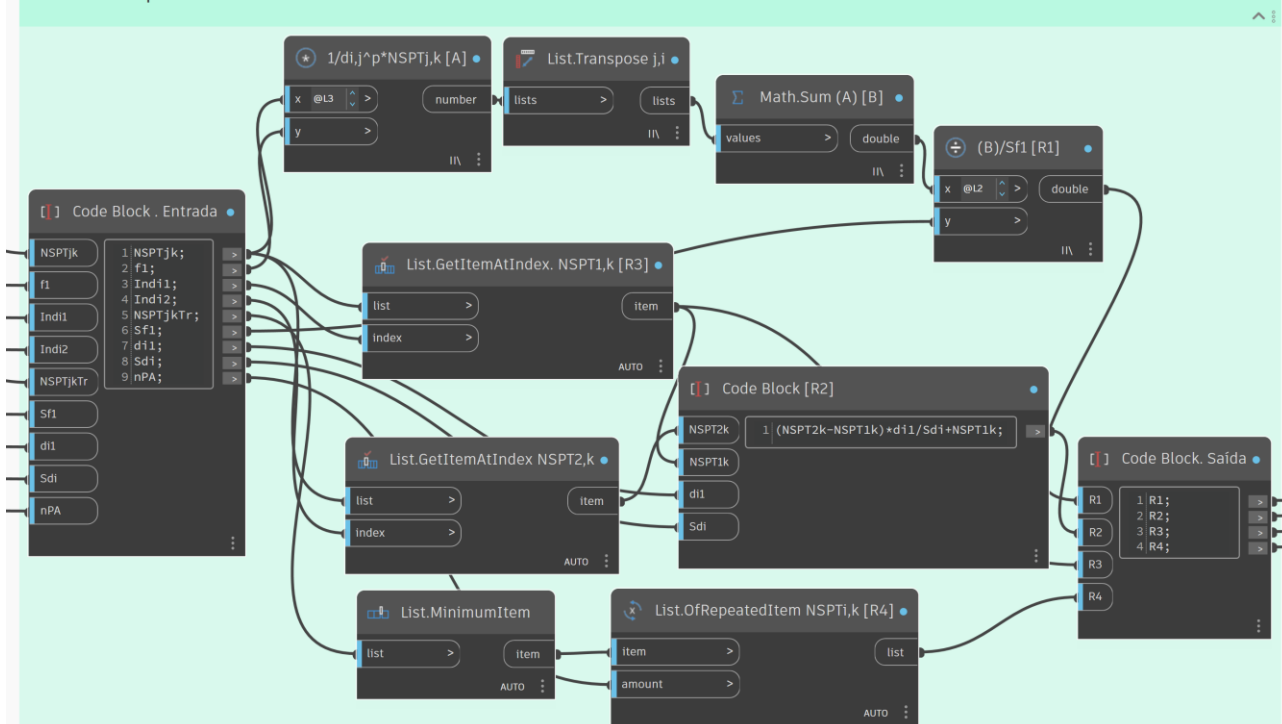
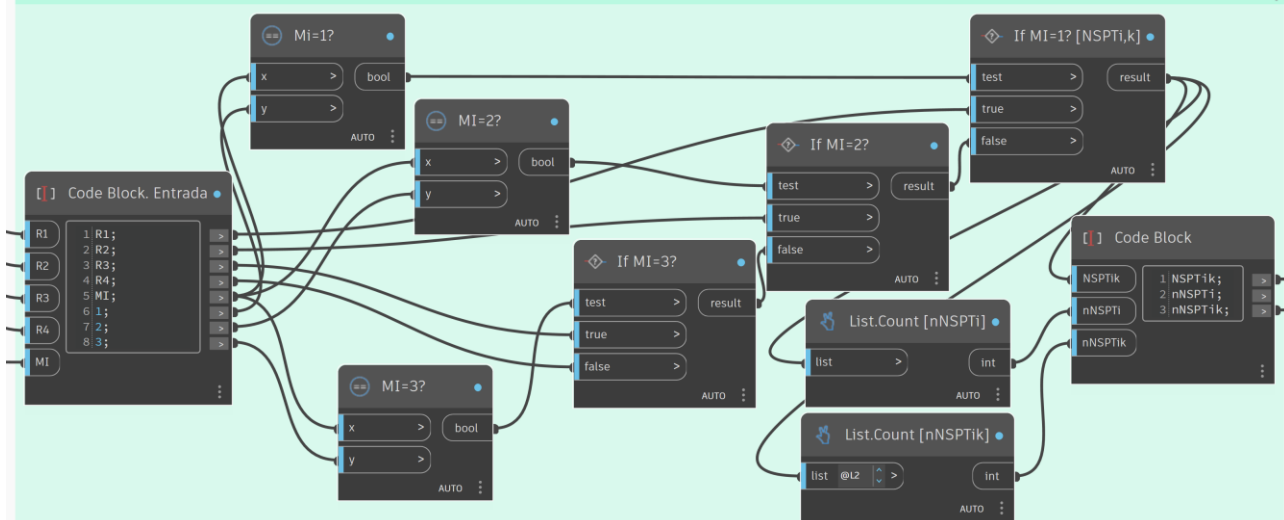
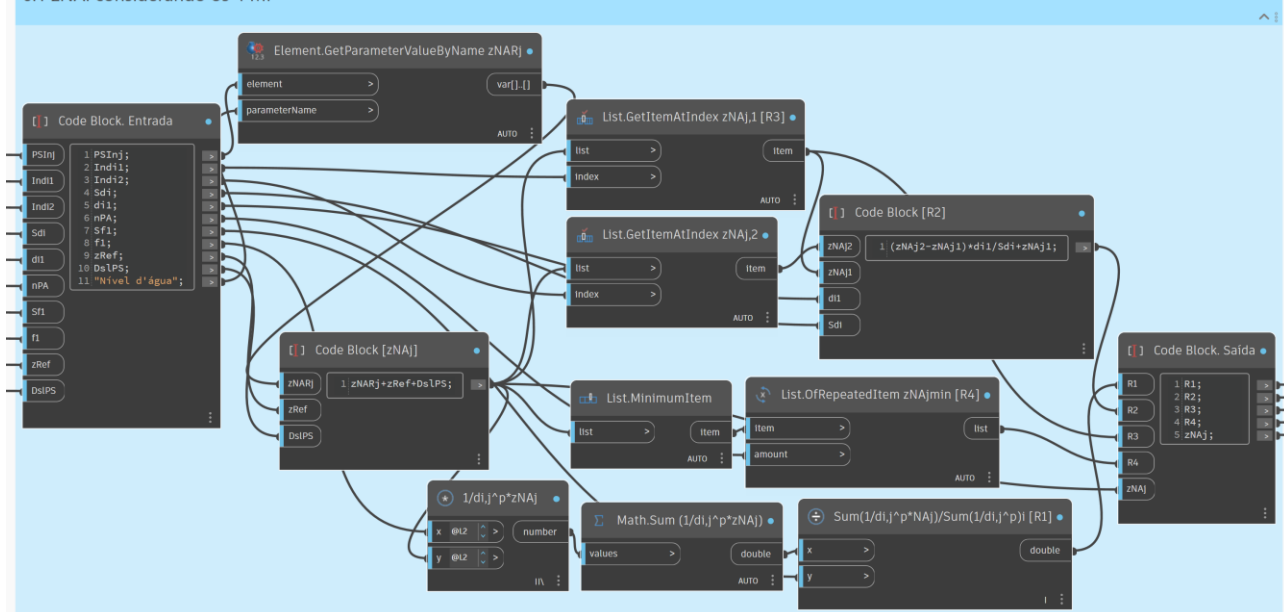


Figura 41 – Interpolação de NSPTj,k, considerando os 4 MI

5.4 NSPT_{i,k} para o MI definidoFigura 42 – Definição de NSPT_{i,k}, função do MI

3.4.5 Definição de zNA_i por interpolação

De forma semelhante, interpola-se, utilizando cada um dos métodos *MI*, as cotas de *zNA_i* (Grupos 6.1 e 6.2, Figura 43 e Figura 44).

6.1 zNA_i considerando os 4 MIFigura 43 – Interpolação de zNA_j para todos os MI

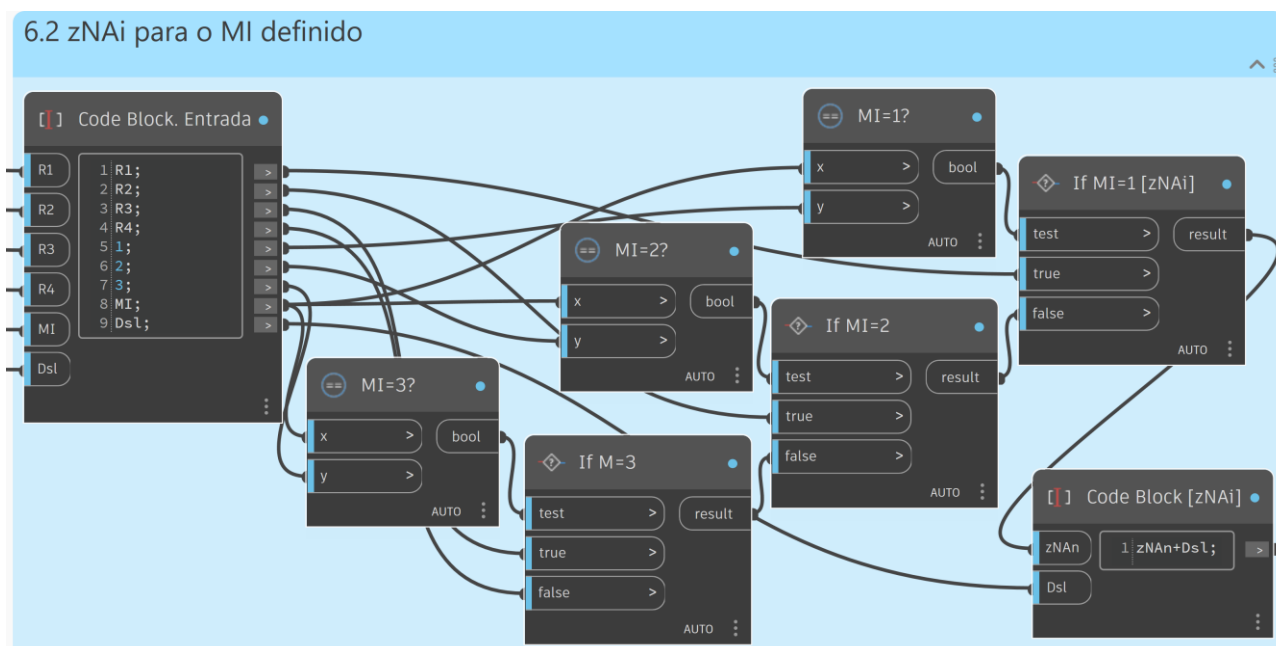


Figura 44 – Interpolação de zNAj para o MI definido

3.4.6 Representação geométrica dos PAi

Os resultados obtidos com a interpolação dos valores de zPA_i , $NSPT_{i,k}$ e zNA_i poderão ser representados graficamente no espaço modelar do *Revit*, com vistas a facilitar a compreensão da natureza do solo sob os pontos de referência, não tendo qualquer relevância matemática ou física. Esta representação tem início na obtenção das coordenadas de elementos gráficos pertinentes a cada representação. O posicionamento vertical da instância de representação de *SPTBIM PA* dependerá do $MPo + Dsl$.

A família que representa o BS no *PAi* foi inserida no *Revit* através do algoritmo contido no Grupo 4.4, ilustrado na Figura 38. Através dessas instâncias, tem-se acesso a todas as propriedades dos PA, por consulta a seus atributos. Tendo como base o ponto $PtPA_i$, estabeleceu-se um mecanismo de representação dos valores de SPT e do NA.

O grupo 5.5 (Figura 45) apresenta o algoritmo a partir do qual a representação geométrica dos $NSPT_{i,k}$ são modeladas, tomando como base as coordenadas de inserção do *PAi* (xPA_i , yPA_i , zPA_i), onde zPA_i é o valor da cota de assentamento da instância da família, levando em consideração as cotas interpoladas, mas também o método de posicionamento (MPo) e o deslocamento definido Dsl . A matriz $NSPT_{i,k}$ apresenta os i PA e, em cada um deles, $nNSPT$ leituras de penetrações realizadas em campo e reportadas no BS. Também é conhecido que a profundidade de penetração é normalizada e corresponde a 1m constante para cada camada.

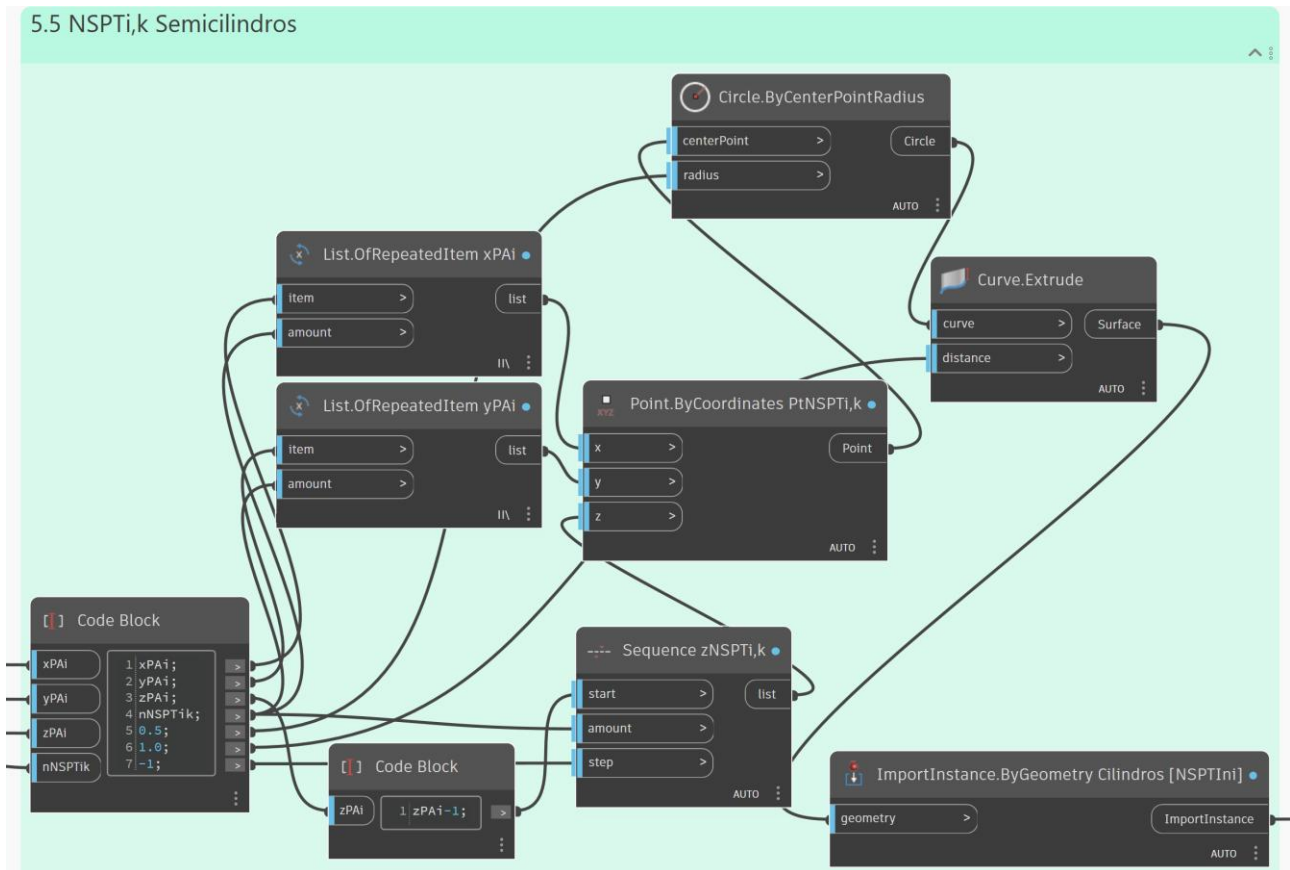


Figura 45 – Representação gráfica dos NSPT_{i,k}

Tomando-se como base zPA_i , gera-se um vetor de $nNSPT_{i,k}$ posições, tirando da primeira camada, 1 m a cada elemento do vetor. O atributo *start* do nó *Sequence zNSPT_{i,k}* recebe $zPA_i - 1$, *amout*, o valor $nNSPT_{i,k}$ (número de camadas uniformizado), e *step*, a constante - 1. Assim, compõe-se as coordenadas de cada um dos $nNSPT_{i,k}$ pontos centrais dos círculos de representação (*Point.ByCoordinates PtNSPT_{i,k}*). Círculos (não mais semicírculos) nesses pontos, através do nó *Circle.ByCenterPointRadius*, cujo raio é a constante 0,5 m. Através de *Curve.Extrude*, os círculos serão extrudados, formando cilindros interconectados do ponto mais baixo até a superfície do terreno.

Esses cilindros sofrerão colorações distintas em tons de verde para representar resistência à penetração. Quanto mais clara a cor, menor o valor de NSPT (menos resistente). Quanto mais escuro, maior o valor de NSPT (mais resistente). A escala de cores é dada por 0 (o mais claro) a 1 (o mais escuro). Portanto, o índice 0 corresponde ao menor valor de NSPT, e 1, o maior. Valores intermediários serão representados com cor proporcional do espectro.

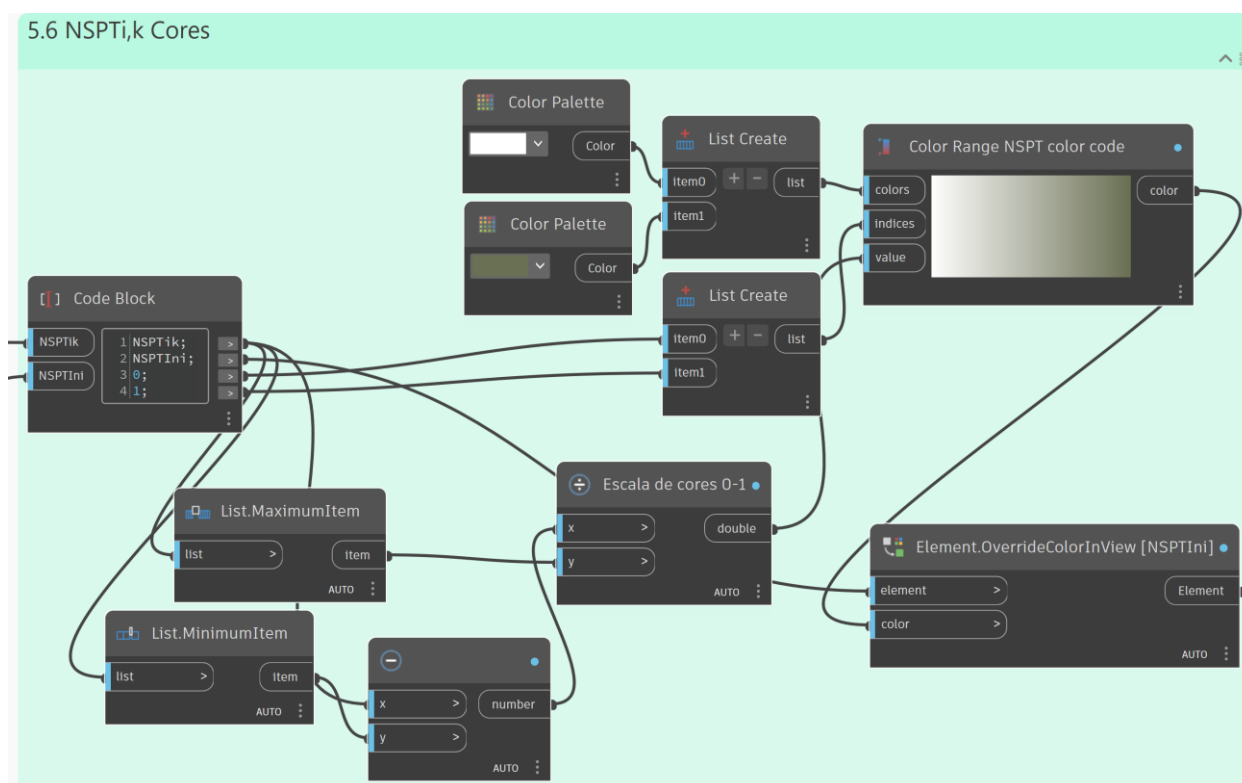


Figura 46 – Representação por cores dos cilindros de NSPT

De forma análoga é a representação do nível d'água (NA_i), cujo código é ilustrado no Grupo 6.2 (Figura 47). Consiste da introdução de um cilindro azul de raio 0,65 m e altura 0,15 m. A profundidade da representação é dada por $zPA_i - zNA_i$.

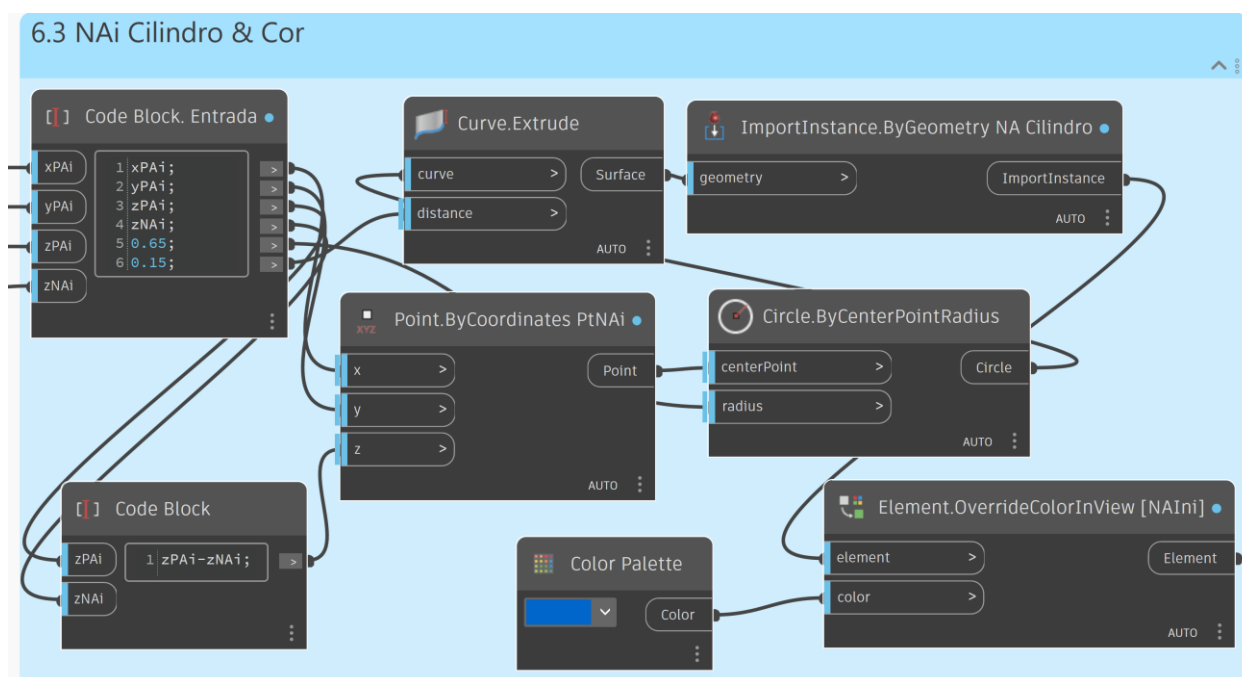


Figura 47 – Representação do NAI

3.4.7 Registro de valores na instância da família

Para fins de documentação e possível utilização por programas específicos de engenharia, os valores obtidos deverão ser registrados em parâmetros pertinentes em cada *PAIni*.

O parâmetro *Nome do furo* seguirá, automaticamente, a mesma lógica adotada quando da inserção dos *PSj*. Admitindo-se, por exemplo, que a estrutura de nomeação do ponto seja “SP 01”, com numeração sequencial. Se foram inseridos três PS, espera-se que sejam nomeados assim: SP 01, SP 02 e SP 03. Nesse caso, espera-se que o próximo PS, no caso um PA, seja assim nomeado: SP 04.

O código do grupo 7.1, ilustrado na Figura 48, apresenta os mecanismos utilizados para a população dos atributos *NSPT*, *xFS*, *yFS*, *zFS*, *Nível d’água*, *Método de Interpolação (MI)*, *Método de Posicionamento (MP)* e *Trava*. Conhecidos o nome do atributo e seus valores, o nó *Element.SetParameterByName* realiza a atribuição dos parâmetros de instância, enquanto que *Elements.SetParameterByNameTypeOrInstance* realiza atualiza os atributos de tipo.

Adotou-se como critério para nomeação dos novos *PAi* interpolados a mesma estrutura dada aos nomes dos *PSj*. Partindo-se do princípio de que os *PSj* possuem a estrutura de seu nome dado como *AAAnn*, onde *AA* são dois dígitos alfanuméricos e *nn*, um número sequencial iniciando com 01, o nome dos *PAi* corresponderá aos mesmos caracteres, adicionado à numeração sequencial, seguindo “(*int*)”, denotando tratar-se de pontos de interpolação. Por exemplo, Se há três pontos de sondagem (*SP01*, *SP02* e *SP03*) os *PAi* serão nomeados da seguinte forma: *SP04(int)*, *SP05(int)* e assim por diante (Grupo 7.2, Figura 49).

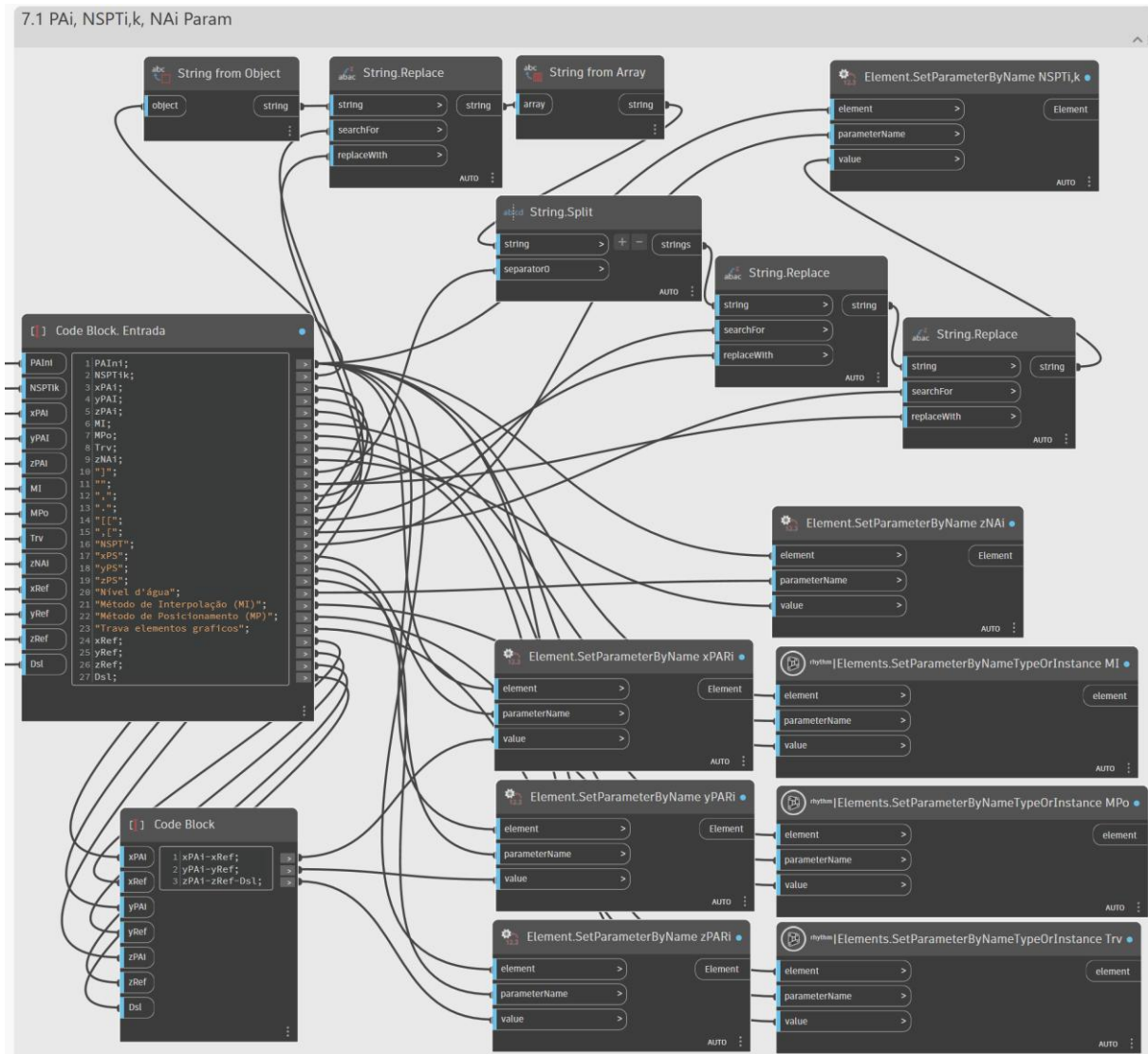


Figura 48 – População de valores nos atributos da instância

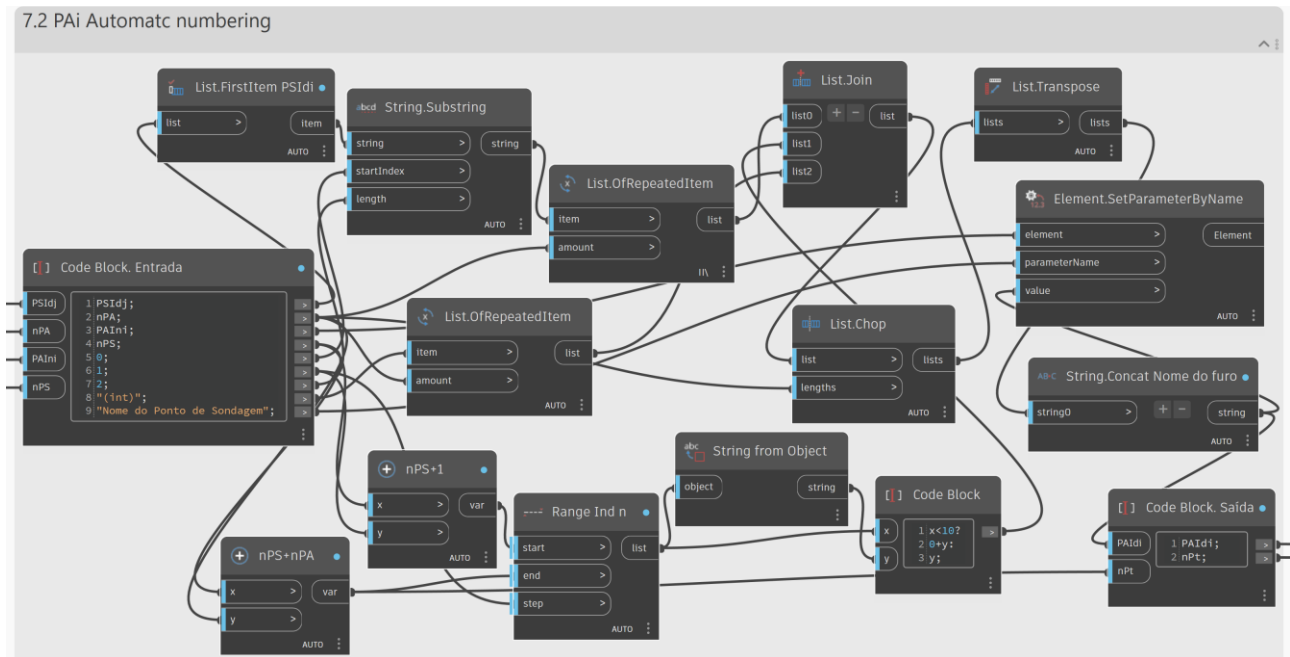


Figura 49 – Nomeação automática dos PAi

Os resultados obtidos com a interpolação das coordenadas dos pontos de análise (zPA_i), dos I e dos zNA_i poderão ser exportadas para uma planilha *Excel*. O objetivo é possibilitar ao usuário gerar arquivos que eventualmente possam ser interpretados por softwares especialistas, com vistas ao dimensionamento estrutural de elementos de fundação, por exemplo. Os Grupos 8.1 (Figura 50) e 8.2 (Figura 51) apresentam algoritmo que tem por objetivo organizar as informações na planilha, cujo resultado será semelhante à planilha de representação do BS.

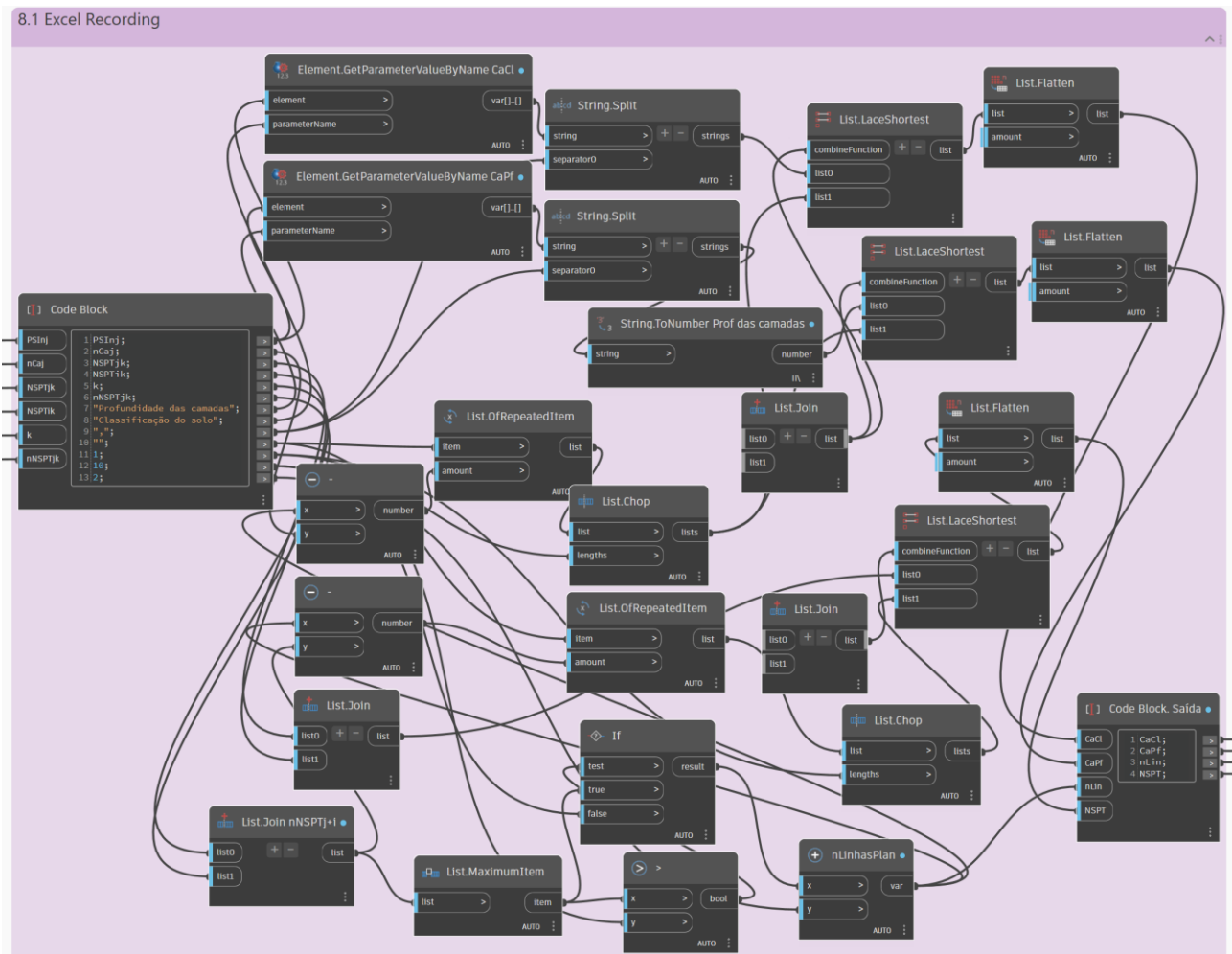


Figura 50 – Organização dos dados para exportação em planilha Excel

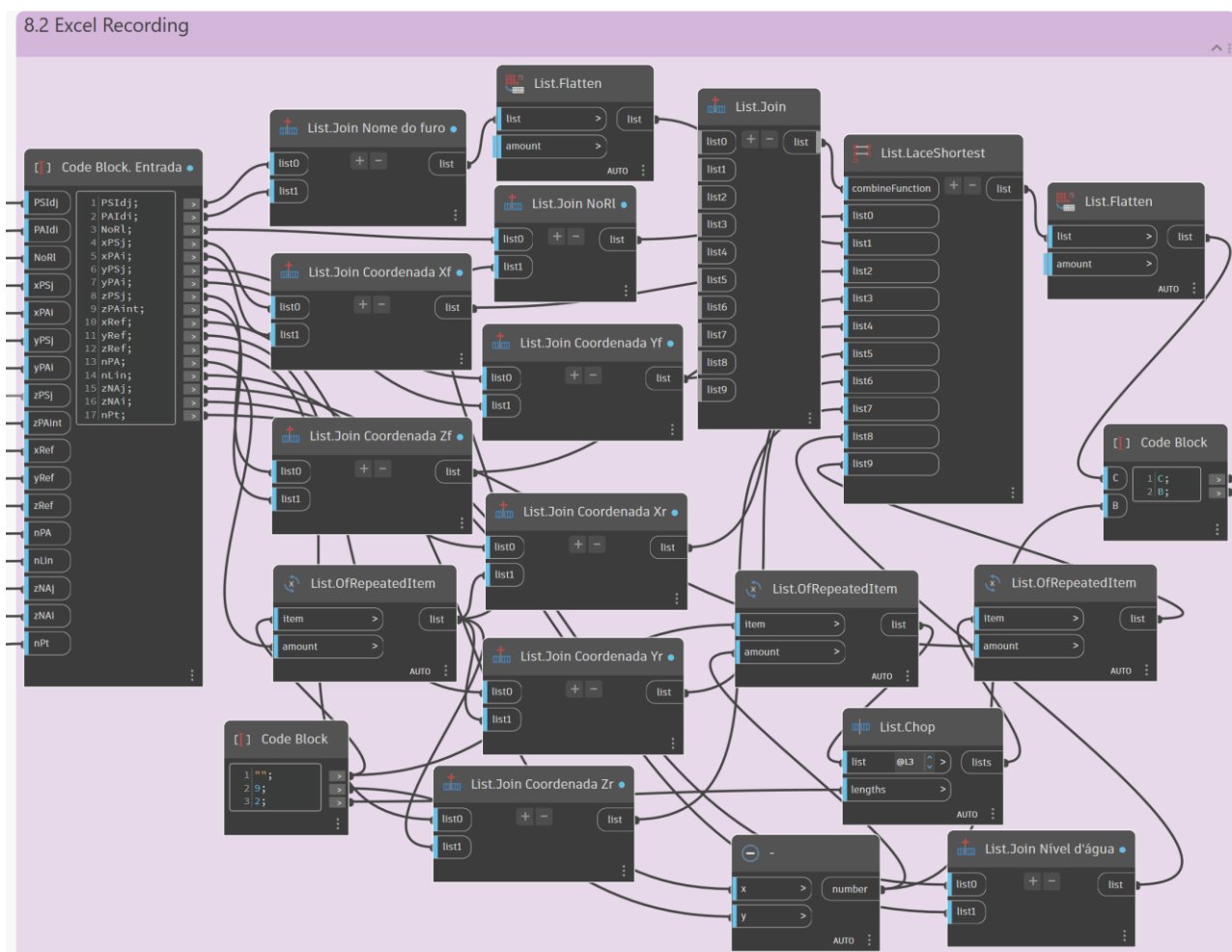


Figura 51 – Exportação de dados para planilha Excel

O algoritmo apresentado no Grupo 8.3 (Figura 51) completa o processo, alocando as matrizes de dados nas respectivas células em Excel, através do nó *Data.ExportToExcel*.

A estrutura básica para o armazenamento das propriedades referentes a um PS (e também aos PA definidos) seguem a ilustração da Figura 52: A coluna A possui valores fixos correspondentes aos títulos das propriedades correlatas definidas na linha correspondente da coluna B. A coluna C apresenta as profundidades de cada uma das camadas de solo identificadas, seguidas de sua descrição, na coluna D. Os valores de NSPT são apresentados, finalmente, na coluna E. Os PS e os PA são apresentados dessa forma, considerando uma distância de $n_{NSPTi,k}$ uniformizada. Assim, se o número máximo de $n_{NSPTi,k}$ é 15, haverá uma distância de 17 linhas entre um PS/PA e o próximo.

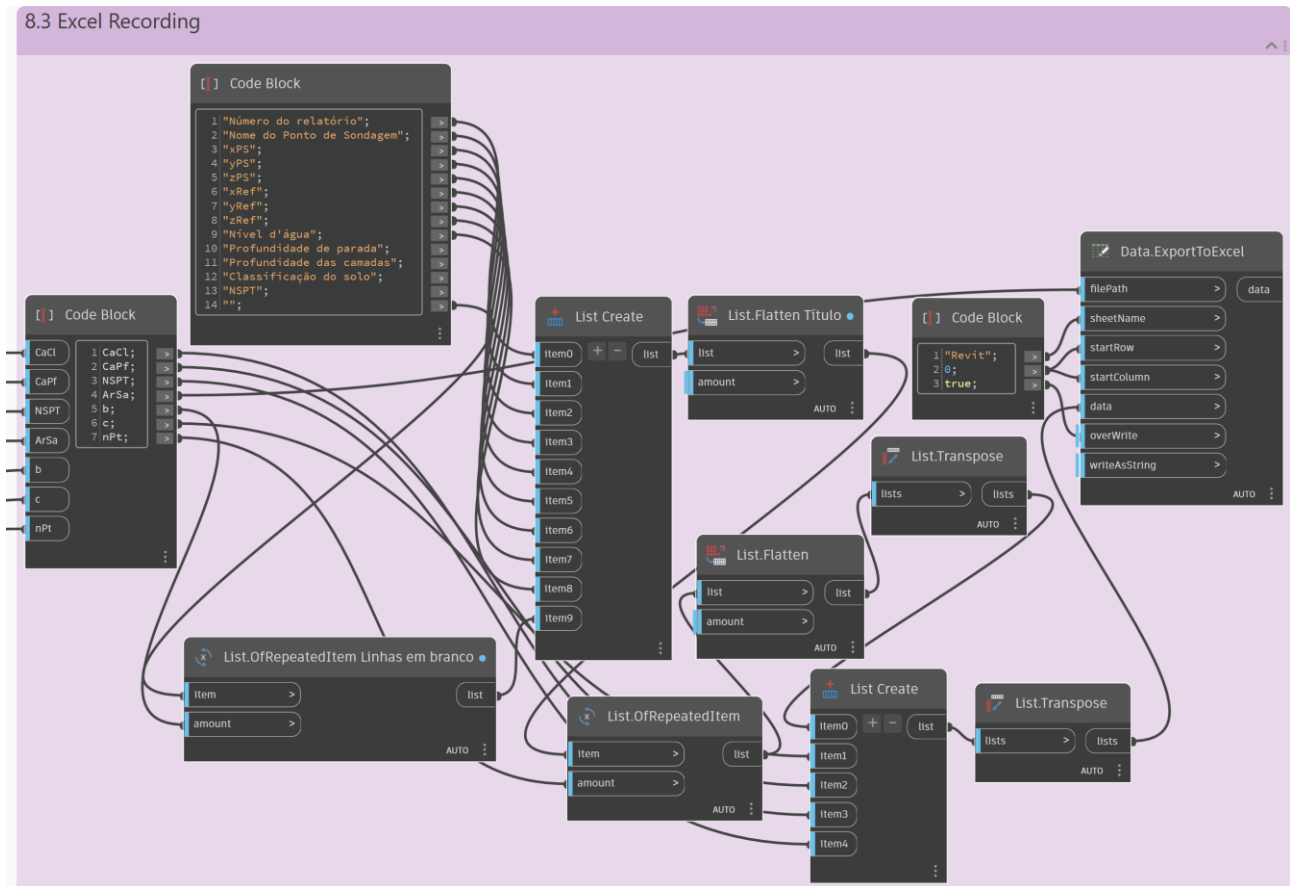


Figura 52 – Exportação de dados para planilha Excel

	A	B	C	D	E	F	G
1	Número do relatório	1507/24	5	SILTE ARENOSO	2		
2	Nome do furo	SP01	7	SILTE ARENOSO	4		
3	Coordenada Xf	5	8	SILTE ARGILO-ARENOSO	6		
4	Coordenada Yf	7	13	ARGILA SILTO-ARENOSA	8		
5	Coordenada Zf	7	15	AREIA SILTOSA	10		
6	Coordenada Xr	1			12		
7	Coordenada Yr	2			14		
8	Coordenada Zr	3			16		
9	Nível d'água	1			18		
10	Profundidade de parada	15			20		
11					22		
12					24		
13					26		
14					28		
15					30		
16							

Figura 53 – Organização dos dados na planilha

Finalmente, o processo de instanciação das famílias *SPTBIM PA*, com seus atributos atualizados, é concluído no Grupo 9 (Figura 53), onde o nó *Element.SetPinnedStatus* irá fixar cada um dos elementos gráficos introduzidos no modelo (caso seja configurado para isso). De forma análoga, *Helpers.ToggleElementBinder*, componente de um pacote adicional para *Dynamo* denominado *Rythm* (deverá ser previamente instalado), permite que o *Dynamo* desconecte cada um dos elementos adicionados assim que finalizado a seção do programa.

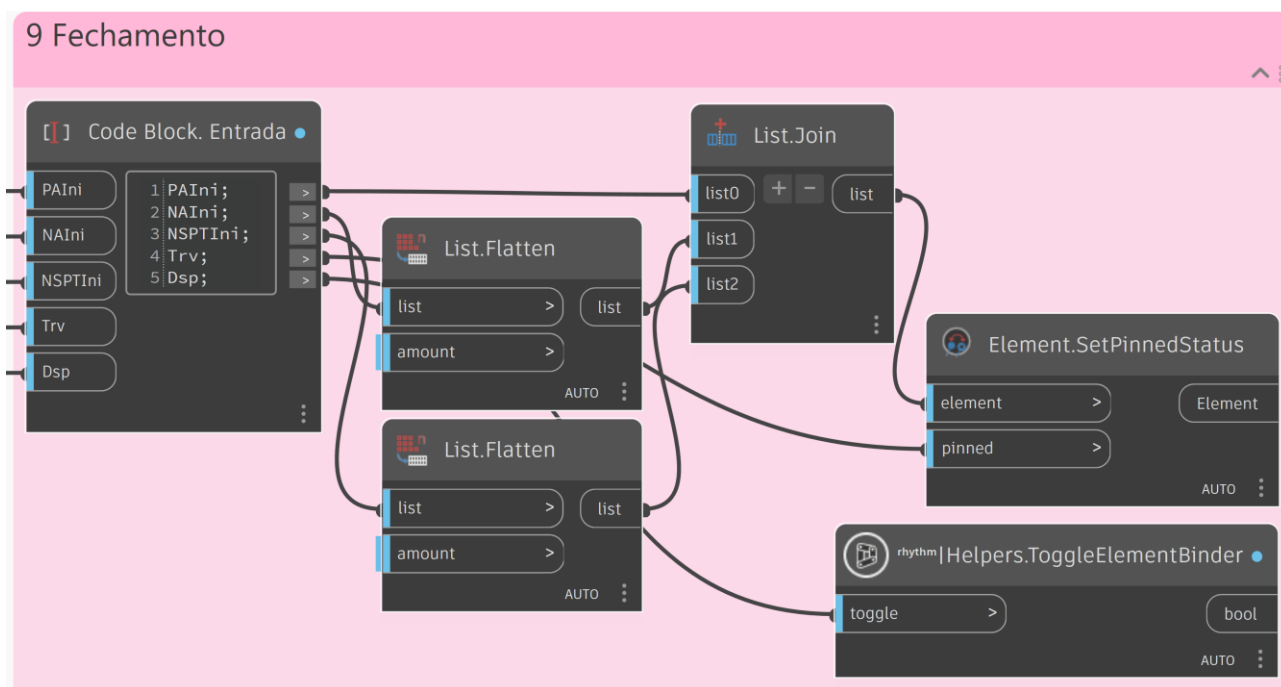


Figura 54 – Finalização da instanciação da família dos pontos interpolados

A Figura 54 ilustra o aspecto geral do código *Dynamo* para implementação do *SPTBIMInterpol*. As posições relativas dos Grupos podem não corresponder ao que é mostrado na figura, uma vez tratar-se de localizações aleatórias.

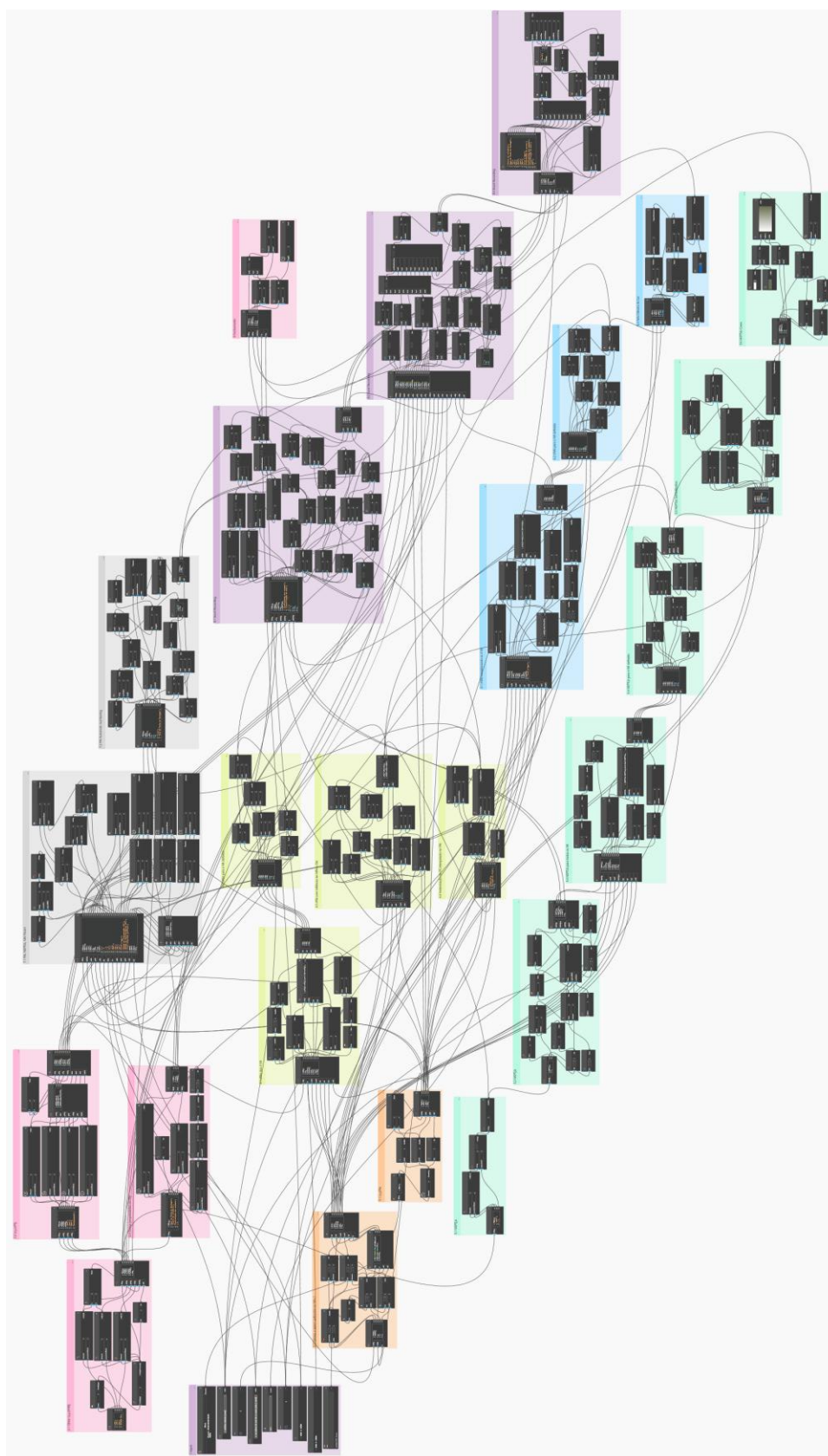


Figura 55 – Aspecto geral do código Dynamo de SPTBIMImport

4 APLICAÇÃO

O Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) ofereceu, no semestre 2024/I, a disciplina CIV 796 Problemas Especiais - Métodos de colaboração BIM nas Construções, com o objetivo de experimentar a execução de projeto multidisciplinar de um trecho rodoviário que inclui uma ponte, inteiramente em ambiente BIM, utilizando a plataforma de um CDE para a colaboração entre as partes.

A disciplina contou com uma coordenação geral de projeto, projetistas estruturais, agrimensor, projetistas de traçado geométrico, pavimentação e sinalização de estradas, projetista de fundações, de drenagem urbana, análise de impacto ambiental e utilização de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foi simulando um escritório de engenharia para a criação de um projeto multidisciplinar.

Utilizou-se os aplicativos propostos neste relatório para simular relatório de ensaios SPT com simples reconhecimento do solo. O resultado desta etapa permitiu a realização da análise geotécnica da fundação da ponte e de estabilidade dos taludes de corte e aterro, proporcionando ainda o estudo do comportamento e aplicação do modelo paramétrico, contribuindo também com um passo na maturação da geotecnia no universo BIM.

Todo o projeto foi coordenado por meio de um ambiente comum de dados (CDE- *common data environment*), que permitiu o íntegro e pleno compartilhamento de informações, mais uma vez valorizando e facilitando a interoperabilidade.

No contexto da disciplina, optou-se por área de estudo a região de Buenos Aires (Icó-CE). Dela foi escolhido o local mais adequado para o traçado da estrada, considerando utilização de SIG e análise multicritério, cujo resultado é apresentado na Figura 56, com a finalidade de ligar duas estradas existentes, com a necessidade da construção de uma ponte para vencer um lago.



Figura 56 – Região para implantação da estrada em Buenos Aires, Icó/CE

Fonte: Google Earth

O traçado da estrada foi realizado depois de um estudo multicritério em SIG e sob as curvas de nível do terreno no *software* Autodesk Civil 3D, possibilitando a modelagem dos cortes e aterros para a construção da estrada. O traçado final é apresentado na Figura 56.

Conforme o item 4.3 da NBR 6122/2022, as sondagens são indispensáveis e devem ser executadas de acordo com a NBR 6484/2020. Além disso, o DNIT possui normas e especificações técnicas para a realização de sondagens em obras de infraestrutura de transporte, como rodovias e ferrovias. Suas principais normas relacionadas à locação de pontos de sondagem são:

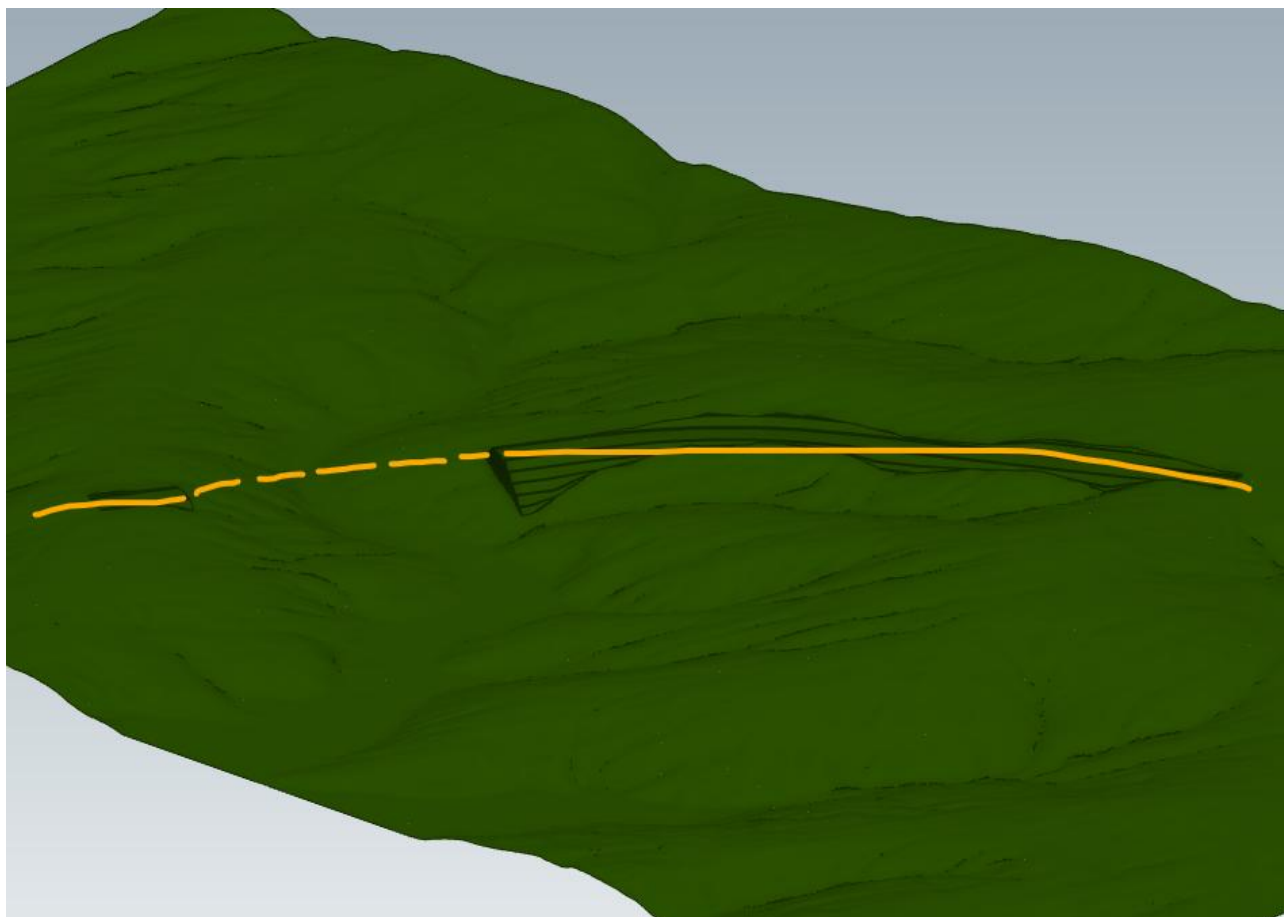


Figura 57 – Traçado da estrada (ponte em tracejado)

DNIT 064/2004 – PRO Estabelece os procedimentos para a execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos, incluindo a metodologia para a cravação do amostrador, registro dos dados de resistência à penetração, entre outros; e

DNIT 065/2004 – PRO Estabelece as diretrizes para a realização de ensaios de sondagem em obras de infraestrutura rodoviária, com recomendações sobre a locação dos pontos de sondagem, profundidade mínima dos furos, e frequência das sondagens.

Os procedimentos do DNIT para a locação de pontos de sondagem incluem:

1. Estudo Preliminar do Projeto:

Análise dos planos e especificações do projeto para determinar as áreas críticas que necessitam de investigação detalhada;

2. Distribuição dos Pontos:

- a. Para rodovias, a locação deve ser feita ao longo do eixo da rodovia e também nas áreas de acostamento e taludes;
- b. Em pontes e viadutos, os pontos devem ser locados nos apoios, intermediários e nos encontros;
- c. Em áreas com possíveis problemas geotécnicos (aterros, cortes, zonas de instabilidade), deve-se aumentar a densidade de pontos de sondagem;

3. Profundidade dos Furos:

As profundidades das sondagens são determinadas com base no tipo de obra e nas camadas de solo encontradas. Para rodovias, as sondagens devem atingir uma profundidade que permita identificar as camadas de solo até pelo menos 2 metros abaixo da cota de implantação do pavimento; e

4. Registro e Relatório:

Todos os dados de locação, execução e resultados das sondagens devem ser registrados detalhadamente e apresentados em um relatório técnico conforme as especificações do DNIT.

Para este projeto, o estudo preliminar se baseou na análise dos mapas e do levantamento topográfico, visto a inviabilidade de visita ao referido local. Os pontos de sondagem foram distribuídos no comprimento do vão da ponte visando as recomendações supracitadas, e para fins de pesquisa. Também foram simulados furos de sondagem no trecho de estrada. No total, foram 16 furos, quatro localizados no eixo da estrada, como ilustrado na Figura 58.

Os resultados dos ensaios aplicados a este relatório foram simulados de acordo com os dados conhecidos provenientes de ensaios realizados pela UFV. Não tem, portanto, qualquer veracidade. Adaptou-se a planilha usada para apresentação dos resultados, de forma a ser legível pelo *SPTInsert*. A Figura 59 ilustra apenas o furo SP-01.

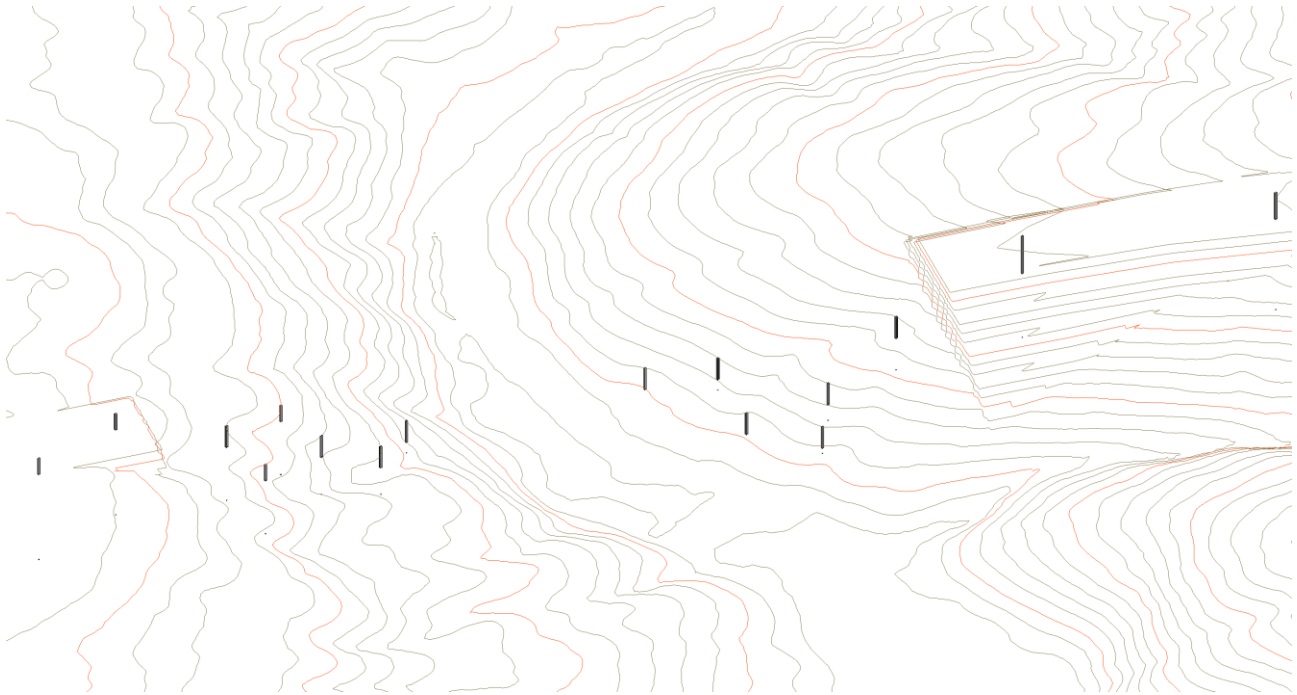


Figura 58 – Locação dos furos de sondagem (pilares de referência)

1	2	3	4	5
Nº Relatório	2024/5	6 Argila Silto Arenosa com Pedregulho Cor Marrom		3
Nº PS	SP-01	12 Silte Arenoso Cor Rosa		5
xPS	0	17 Silte Arenoso com Veios de Alteração de Rocha Cor		4
yPS	0			5
zPS	0			9
xRef	0			12
yRef	0			11
zRef	0			9
Profundidade	13			8
Nível d'água	9			12
				9
				17
				21

Figura 59 – Furo de sondagem SP-01

As coordenadas (x,y,z) da Figura 59 são nulas porque, neste caso, foi usado o método de locação por referenciamento de elementos no *Revit*: as colunas alocadas na topografia (Figura 58) foram selecionadas como referências para a locação da família paramétrica no universo virtual do projeto.

Foram, assim, obtidos os furos de sondagem parametrizados e alocados no terreno conforme as Figuras 60 e 61.

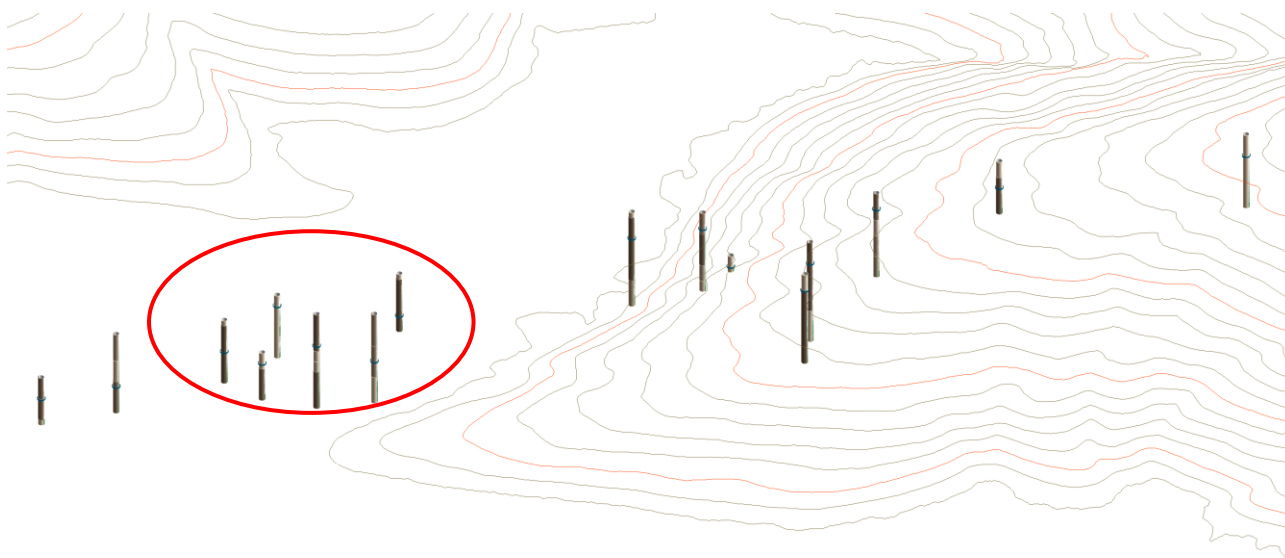


Figura 60 – Furos de sondagem representados abaixo dos pilares de referência

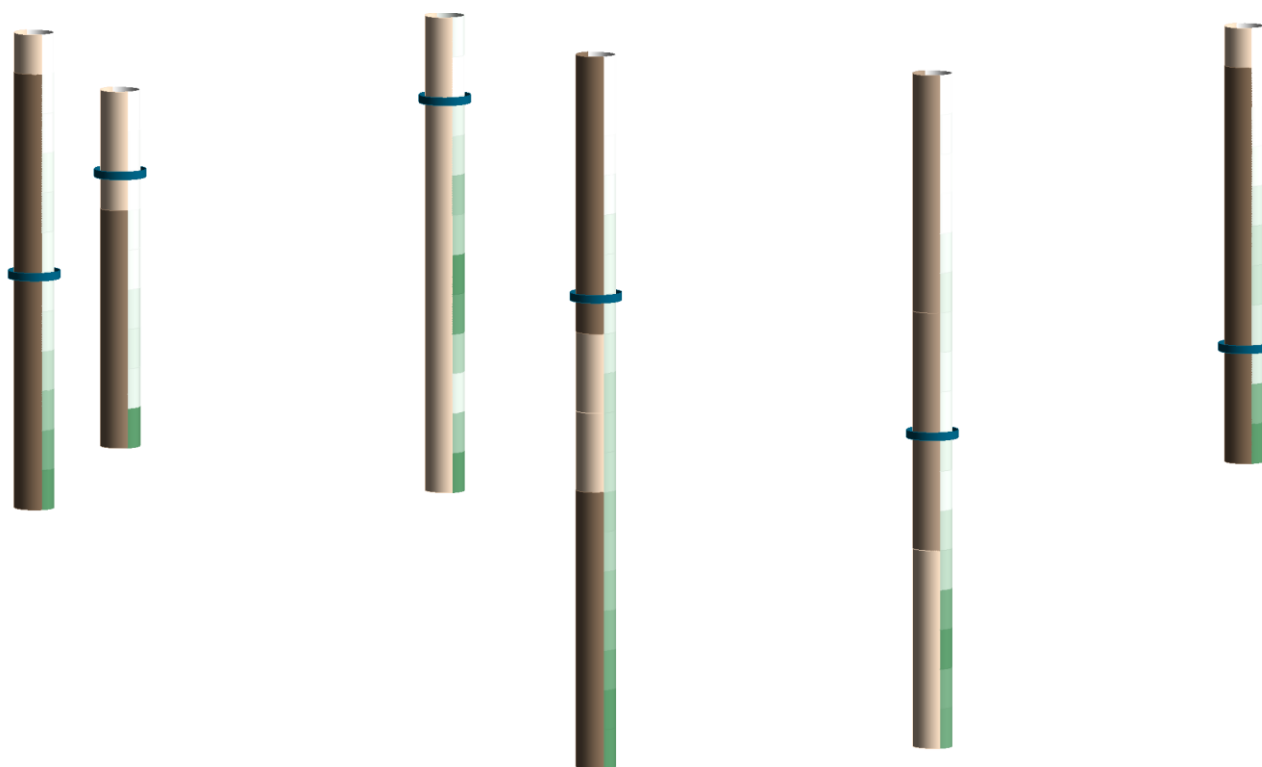


Figura 61 – FS parametrizados conforme a planilha eletrônica de ensaio

Seguindo estes resultados, a etapa seguinte foi produzir os perfis geológicos do local, as análises de estabilidade de talude e das fundações.

5 EXPORTAÇÃO DE DADOS DE SONDAÇÃO IFC

Um modelo BIM pressupõe, por definição, ser interoperável. A interoperabilidade é um mecanismo que viabiliza a troca de informação de um software para outro, usando uma especificação padrão universal, através de um formato de arquivo neutro e aberto. No caso deste projeto, a interoperabilidade permitirá que as informações constantes no BS digital sejam exportadas para utilização em outro software compatível, capazes de mapear entidades, conforme o padrão estabelecido.

O padrão mais comumente utilizado para exportação de arquivos BIM é o *Industry Foundation Classes* (IFC), cuja versão oficial apropriada para a transferência de informações de infraestrutura é a 4.3. Trata-se de um conjunto de especificações de classes para a representação geométrica e não geométrica de uma construção e seu entorno. Acompanha as especificações um formato de arquivo neutro e aberto.

Em IFC, a representação geral de um modelo geológico/geotécnico é definida na entidade *IfcGeotechnicalAssembly* (abstrata). Seu uso (enquanto montagem de camadas de informações) é opcional, mas pode conter informações sobre metodologia e incertezas. Poderão incluir subtipos *IfcGeotechnicalStratum* e podem incluir outros tipos de entidades, como *IfcPile*, *IfcSlab* ou *IfcSensor*, para representar o revestimento, alinhamento ou equipamento de registro (para modelos mais completos).

IfcBorehole é a entidade normalmente utilizada para representar camadas do ponto de sondagem, cuja instância, uma vez herdando os atributos de *IfcProduct*, possui, entre outras informações de identificação, posicionamento e representação geométrica.

Há diversos *PropertySets* (Pset) de interesse para representação do NSPT, nível d'água, etc. A lista é extensa, compreendendo vários aspectos da geotécnica, mas os mais relevantes para efeitos deste trabalho são apresentados no Quadro abaixo:

Quadro 5 – Aspectos da geotécnicos

Pset	Atributo	Descrição
<i>Pset_GeotechnicalStratumCommon</i>	<i>StratumColour</i>	Cor de representação da camada.
	<i>IsTopographic</i>	Trata-se da primeira camada, aquela originada na superfície do terreno?
	<i>Texture</i>	Texto indicando o solo correspondente à camada.
<i>Pset_SolidStratumCapacity</i>	<i>NValue</i>	Número de golpes a partir de ensaios de penetração padrão, de acordo com a ABNT NBR 6484/2020.
<i>Pset_BoreholeCommon</i>	<i>GroundwaterDepth</i>	Nível d'água

Proposta alternativa e mais simples é aquela em que se utiliza *propertysets* do usuário, na qual os dados interoperáveis da proposta poderiam ser exportados através de instâncias de *IfcPropertySet*. Embora mais simples, não é recomendado em situações em que há classes e propriedades previamente definidas, como o caso deste trabalho (*IfcBoreHole*).

Estudo mais detalhado sobre a representação de dados geotécnicos de sondagens está sendo conduzido pela doutoranda Maria Luiza Ribeiro Antunes (PPGEC/UFV), cuja tese está prevista para publicação no primeiro semestre de 2025.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este relatório apresenta uma metodologia para o desenvolvimento de um modelo BIM parametrizado contendo as informações concernentes a um ponto de sondagem, resultado dos ensaios de introspecção de solos, do tipo SPT.

A proposta compreende o desenvolvimento de um modelo paramétrico no Autodesk *Revit*. Os parâmetros foram obtidos de um estudo preliminar no qual as informações geotécnicas representativas de um solo foram levantados e mapeados. Desenvolveu-se também um padrão de representação geométrica condizente com um boletim de sondagem para mera visualização do componente em modelos BIM.

O plugin *SPTInsert* foi desenvolvido em *Dynamo* para possibilitar a extração de dados de uma planilha MS *Excel* contendo um boletim de sondagem típico para inserir o modelo paramétrico e administrar os dados correspondentes. Tem-se no modelo BIM de um terreno, as representações e os dados de pontos de sondagem, obtidos de um boletim técnico. Por sua vez, desenvolveu-se outro plugin (*SPTInterpol*) com o objetivo de capturar pontos sob os quais deseja-se conhecer os valores de SPT e nível d'água. Estes valores são obtidos através de métodos de interpolação com os pontos existentes.

Apresentou-se também uma aplicação dessa ferramenta na concepção do projeto de uma ponte experimental, demonstrando sua utilidade.

Este conjunto de informações poderá ser acessado por outro *software* que utilize o padrão IFC de intercâmbio de dados. Um breve estudo da sua concepção para fins de conhecimento do solo de fundação foi também apresentado.

Embora carecendo de um estudo mais amplo no que tange à extensão das informações geotécnicas/geológicas que podem vir a fazer parte da ferramenta, o método aqui apresentado demonstrou tem potencial significativo para o desenvolvimento de projetos de elementos fundações e obras de terra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR 6122:2022 – Projeto e execução de fundações.

_____. ABNT NBR 6484:2020 – Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio.

_____. ABNT NBR 6489:2019 – Solo – prova de carga estática em fundação direta.

ASSALIM, L. Avaliação da conformidade como ferramenta de aprendizagem organizacional em projetos de engenharia de grandes empreendimentos. Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.

BRAJA, M. e SOBHAN, K. Fundamentos de engenharia geotécnica. São Paulo: Thomson Learning, p. 561, 2014.

CINTRA, J. C. A; AOKI, N. e ALBIERO, J. H. Fundações diretas: projeto geotécnico. Oficina de textos, 2011.

EASTMAN, C. M. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. John Wiley & Sons, 2011.

ELLIS, B. A. Building information modeling: an informational tool for stakeholders. Government/Industry Forum by the Federal Facilities Council. Citeseer. pp. 1–5. 2006.

GARCIA, N. P.; e DEVINCENZI, M. J. Comparativo de procedimentos para descrição e identificação de solos segundo as normas NBR, ISSO e ASTM, 2013.

HALFAWY, M. R; FROESE, T. Modeling and implementation of smart AEC objects: an IFC perspective. Proceedings of the CIB w78 Conference: Distributing Knowledge in Building, Aarhus School of Architecture, pp. 1–8, 2002.

IRELAND, H.O.; MORETTO, O.; e VARGAS, M. Discussion: The dynamic penetration test: a standard that is not standardized. Géotechnique 20.4, pp. 452–456, 1970.

LAWSON, B. Oracles, draughtsmen, and agents: the nature of knowledge and creativity in design and the role of IT. Automation in construction 14.3, pp. 383–391, 2005.

LUNNE, T.; POWELL, J. J. M.; e ROBERTSON, P. K. Cone penetration testing in geotechnical practice. CRC Press, 2002.

MATA, P.; SILVA, P. F.; e PINHO, F. F.S. BIM–GGIM. 15º Congresso Nacional de Geotecnia: a Geotecnia e os desafios sociais. Sociedade Portuguesa de Geotecnia., pp. 1–10, 2016.

MONEDERO, J. Parametric design: a review and some experiences. Automation in Construction 9.4, pp. 369–377, 2000.

MORALE, M. Fluxo de Projetos em BIM: Planejamento e Execução. primeira. Vol. 2. Guia AsBEA: Boas Práticas em BIM. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS ESCRITÓRIOS DE ARQUITETURA AsBEA, 2015.

ORLIKOWSKI, W. J. The duality of technology: Rethinking the concept of technology in organizations. Organization science 3.3, pp. 398–427, 1992.

PIÑEROS, I. N. C. Gestión de datos y procesos geotécnicos con un énfasis de la aplicación de BIM: revisión bibliográfica, 2017.

CROTTY, R. The impact of building information modelling: transforming construction. Routledge, 2013.

SACKS, R; EASTMAN, C. M. e LEE, G. Parametric 3D modeling in building construction with examples from precast concrete. Automation in construction 13.3, pp. 291–312, 2004

SCHNAID, F e ODEBRECHT, E. Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações: 2ª edição. Oficina de Textos, 2012.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in construction 18.3, pp. 357–375, 2009.

WATERHOUSE, R. National BIM Report, pp. 1–22, 2017.

ZHANG, D. An analysis of building information modelling (BIM) implementation from a planned behavior perspectiv”. HKU Theses Online HKUTO, 2015.

ZHANG, J. The work flow and operational model for geotechnical investigation based on BIM. IEEE Access 4, pp. 7500–7508, 2016.