



ERMES DOS SANTOS VERA CRUZ  
Licenciado em Ciências de Engenharia  
Universidade NOVA de Lisboa

# AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS COM RADAR DE PROSPEÇÃO - MONITORIZAÇÃO E VISUALIZAÇÃO EM BIM

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL DE CONSTRUÇÃO  
Universidade NOVA de Lisboa  
Dezembro, 2022





# AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS COM RADAR DE PROSPEÇÃO - MONITORIZAÇÃO E VISUALIZAÇÃO EM BIM

**ERMES DOS SANTOS VERA CRUZ**

Licenciado em Ciências de Engenharia  
Universidade NOVA de Lisboa

**Orientadora:** Simona Fontul,  
Professora Auxiliar Convidada, FCT - Universidade NOVA de Lisboa e Investigadora Auxiliar,  
LNEC

**Coorientadora:** Paula Couto,  
Investigadora Auxiliar, LNEC



## **AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS COM RADAR DE PROSPEÇÃO - MONITORIZAÇÃO E VISUALIZAÇÃO EM BIM**

Copyright © <Nome do Autor>, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o template NOVAtesis Word [11].



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar por agradecer à minha orientadora, Simona Fontul à coorientadora, Paula Couto e também ao seu estagiário, Rodrigo Lima, pela disponibilidade imediata para orientar a minha dissertação.

Os meus agradecimentos, em primeiro lugar, ao meu país, São Tomé e Príncipe, pela oportunidade e ajuda de custos que me concederam durante uma parte do meu percurso universitário, à Faculdade de Ciências e Tecnologia-Universidade Nova de Lisboa e ao Departamento de Engenharia Civil, à FACIT ("faça-se", em latim) - Associação de Solidariedade da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL) e, ainda, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) por me ter recebido como estagiário durante a elaboração da minha dissertação.

Finalmente, os meus agradecimentos aos meus falecidos pais, à minha família (esposa e filhos), aos meus irmãos, aos meus familiares e amigos, não esquecendo ainda os meus colegas e ex-colegas com quem estudei/trabalhei e com quem partilhei os bons e maus momentos durante esta caminhada que hoje se culmina com sucesso e objetivos cumpridos.

Queria agradecer igualmente aos todos os funcionários do LNEC e os docentes e discentes da faculdade que contribuíram diretamente ou indiretamente para que tenha alcançado este objetivo.



“You cannot teach a man anything; you can only help him discover it in himself.” (Galileo).



## RESUMO

Os pavimentos aeroportuários têm um papel importante na operação segura e eficiente do transporte aeroportuário, encontrando-se constantemente sujeitos a ações que contribuem para a redução do seu nível de serviço. Deste modo, é necessária a monitorização do seu estado a fim de detetar e mitigar os defeitos, sendo esta uma das preocupações das entidades responsáveis pela gestão dessa infraestrutura. O conhecimento da sua condição estrutural e funcional é fundamental, já que permite adotar as medidas adequadas para a manutenção e reabilitação do pavimento, mantendo a segurança dos utilizadores.

No setor das infraestruturas de transportes, o conhecimento do tipo de estrutura, dos materiais e da espessura das camadas que o constituem é essencial para a avaliação e monitorização da capacidade de carga e para detetar defeitos nos pavimentos. A medição das espessuras ao longo da vida útil de um pavimento em serviço, como complemento aos resultados dos ensaios de carga não destrutivos, permite detetar atempadamente zonas com capacidade de carga insuficiente, assentamentos e outros defeitos. Neste contexto, o Radar de Prospecção é particularmente útil, pois é capaz de fornecer informação de forma contínua, sendo possível gerir e guardar essa informação em modelos digitais BIM.

Resumidamente, este trabalho teve duas fases, sendo a primeira constituída pela recolha de informação sobre o pavimento nomeadamente, o tipo de camadas e as respetivas espessuras, obtidas através de medições com o Radar de Prospecção. Numa segunda fase, os dados foram inseridos em modelo BIM, onde foi possível analisar a melhor forma de apresentar o pavimento, visualizar os dados de monitorização no modelo e observar eventuais alterações na continuidade do pavimento. Assim, considera-se que o presente trabalho contribui para uma integração e visualização de dados de monitorização com o Radar de Prospecção de pavimentos aeroportuários em modelos digitais.

**Palavras-chave:** Pavimentos Aeroportuários, Radar de Prospecção, Monitorização de Espessura de Camadas, Metodologia BIM.



## **ABSTRACT**

Airport pavements play an important role in the safe and efficient operation of airport transport, and they are constantly subject to actions that contribute to reducing their level of service. Therefore, it is necessary to monitor their condition in order to detect and mitigate defects, which is one of the concerns of the entities responsible for managing this infrastructure. The knowledge of its structural and functional condition is essential, as it allows the adoption of appropriate measures for the maintenance and rehabilitation of the pavement, while maintaining the safety of users.

In the transport infrastructure sector, knowledge of the type of structure, materials and thickness of the layers that constitute it, is essential for the assessment and monitoring of the bearing capacity and for detecting defects in pavements. The measurement of thicknesses throughout the service life of a pavement, as a complement to the results of non-destructive load tests, allows timely detection of areas with insufficient bearing capacity, settlements and other defects. In this context, the Ground Penetrating Radar (GPR) is particularly useful, as it is able to provide information on a continuous basis, being possible to manage and save that information in digital BIM models.

In summary, this work had two phases, being the first one constituted by the collection of information about the pavement, namely, the type of layers and their thicknesses, obtained through measurements with the GPR. In a second phase, the data were inserted in a BIM model, where it was possible to analyse the best way to present the pavement, to visualise the monitoring data in the model and to observe possible changes in the pavement continuity. Thus, this work contributes to the integration and visualisation of monitoring of GPR data for airport pavement surveillance in digital models.

Keywords: Airport pavements, GPR, Monitoring of layer thickness, BIM methodology.



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Enquadramento .....	2
1.2	Objetivos .....	4
1.3	Metodologia .....	4
1.4	Estrutura da dissertação .....	5
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA BIM</b> .....	<b>7</b>
2.1	Considerações iniciais.....	7
2.2	Maturidade BIM .....	8
2.3	Dimensões BIM.....	12
2.4	Interoperabilidade.....	15
2.5	BIM em reabilitação de infraestruturas.....	17
2.6	Considerações finais.....	20
<b>3</b>	<b>PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS</b> .....	<b>22</b>
3.1	Considerações iniciais.....	22
3.2	Constituição de pavimentos.....	22
3.3	Exigências estruturais e funcionais.....	25
3.4	Métodos de monitorização.....	26
3.4.1	Introdução .....	26
3.4.2	Inspeção visual.....	27
3.4.3	Ensaio de carga.....	27
3.4.4	Medição de espessuras .....	28
3.5	Considerações finais.....	30
<b>4</b>	<b>RADAR DE PROSPEÇÃO</b> .....	<b>31</b>
4.1	Considerações iniciais.....	31
4.2	Conceitos gerais .....	31
4.2.1	Evolução histórica .....	34

4.2.2	Princípios fundamentais do método.....	35
4.3	Campos de aplicação.....	37
4.4	Avaliação de pavimentos .....	37
4.4.1	Metodologia de ensaio.....	37
4.4.2	Processamento de dados .....	38
4.5	Ensaio realizado em trecho experimental.....	39
4.6	Considerações finais.....	40
<b>5</b>	<b>CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>41</b>
5.1	Considerações iniciais.....	41
5.2	Descrição do caso de estudo .....	41
5.3	Software BIM.....	42
5.4	Dados de monitorização.....	43
5.5	Desenvolvimento do modelo BIM .....	45
5.5.1	Criação do modelo do projeto .....	45
5.5.2	Modelação do pavimento aeroportuário.....	47
5.5.3	Visualização dos dados de monitorização.....	50
5.6	Desvios das espessuras das camadas .....	55
5.7	Considerações finais.....	62
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>63</b>
6.1	Conclusões.....	63
6.2	Desenvolvimentos futuros .....	64
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>66</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama de Maturidade BIM, adaptado de (Bilal, 2010) e citado por (Carvalho, 2016).....	9
Figura 2.2 - Dimensões do BIM, do 3D ao 10D (Darós, 2017). ....	12
Figura 2.3 - Interoperabilidade entre modelos BIM de diferentes disciplinas (Knittle, 2014), citado e adaptado por (Caeiro, 2021).....	16
Figura 2.4 - Modelação das várias fases da intervenção de reabilitação empreendida na seção de controlo: a) Estrutura de pavimento existente; b) Remoção das camadas de pavimento; c) Camada de reforço de sub-base; d) Construção da camada de sub-base; e) Construção da camada de base; f) Nova estrutura de pavimento após intervenção (Silva, et al., 2020).....	19
Figura 2.5 - Modelo BIM de zona de transição da via-férrea (Silva, et al., 2020).....	19
Figura 2.6 - Modelação BIM de assentamentos na camada de balastro nos primeiros três anos de serviço (Silva, et al., 2020). ....	20
Figura 3.1 - Carote em mistura betuminosa (Fontul, 2021) .....	23
Figura 3.2- Estrutura de pavimentos flexíveis (Fontul, 2021) .....	23
Figura 3.3 - Degradação estrutural dos pavimentos flexíveis (Fontul, 2021).....	23
Figura 3.4 - Estrutura de um pavimento semirrígido (Fontul, 2021). ....	24
Figura 3.5- Carote de um pavimento semirrígido (Fontul, 2021). ....	24
Figura 3.6 - Estrutura de pavimentos rígidos (Fontul, 2021).....	25
Figura 3.7 - Carote de um pavimento rígido (Fontul, 2021). ....	25
Figura 3.8 - Equipamento FWD (Fontul, 2021).....	28
Figura 3.9 - Esquema do FWD (Fontul, 2021).....	28
Figura 3.10 - Poço (Fontul, 2021). ....	29
Figura 3.11 - Medição de espessuras (Fontul, 2021). ....	29
Figura 3.12 - Funcionamento do GPR (Fontul, 2021). ....	29
Figura 4.1 - Diagrama de blocos de um sistema GPR, adaptado de (Takahashi, Kazunori , et al., 2012). ....	32

Figura 4.2 - GPR com antenas de 0.9 e 1.6 GHz .....	33
Figura 4.3 - Antena de 1600 MHz (GSSI, 2022). .....	33
Figura 4.4 - Antena de 900 MHz (GSSI, 2022). .....	34
Figura 4.5 - Fluxograma da metodologia de ensaio e processamento de GPR, adaptado de (Lopes, 2017).....	38
Figura 4.6 - Deflexões medidas no campo com o defletómetro de impacto (Fontul, et al., 2022). .....	38
Figura 4.7 - Interface entre as camadas do pavimento obtida com o GPR (Fontul, et al., 2022). .....	38
Figura 4.8 - Entrada do pavilhão de LNEC.....	39
Figura 4.9 - Pavimento flexível EBVT.....	39
Figura 5.1 - Medição com GPR de 1 GHz.....	44
Figura 5.2 - Aspeto do ambiente de trabalho .....	46
Figura 5.3 - Criação de novo projeto.....	46
Figura 5.4- Alterar as unidades e o número de casas decimais .....	46
Figura 5.5 - Guardar e alterar o número de cópias de segurança.....	47
Figura 5.6 - Modelação do caminho de circulação.....	47
Figura 5.7 - Propriedades .....	48
Figura 5.8- Janela arquitetura - Piso: Arquitetura.....	48
Figura 5.9 - Camada, nível 1 .....	49
Figura 5.10 - Editar propriedades .....	49
Figura 5.11 - Edição de contornos .....	50
Figura 5.12 - Edição das camadas.....	50
Figura 5.13 - Pavimento em planta .....	51
Figura 5.14 - Separador.....	51
Figura 5.15 - Grelhas longitudinais.....	51
Figura 5.16 - Grelhas transversais .....	51
Figura 5.17 - Parâmetros de projeto .....	52
Figura 5.18 - Rooms.....	52
Figura 5.19 - Parâmetros adicionais.....	53
Figura 5.20 - Adicionar parâmetros .....	53
Figura 5.21 - Esquemas/Quantidades.....	53
Figura 5.22 - Dados de projeto.....	53
Figura 5.23 - Criação de novos esquemas. ....	54
Figura 5.24 - Visualização de novos esquemas. ....	54
Figura 5.25 - Inserção de dados .....	54

Figura 5.26 - Esquema de quantidades.....	54
Figura 5.27 - Propriedades do esquema.....	55
Figura 5.28 - Editar campos.....	55
Figura 5.29- Duplicação de vista em planta, "level 1" .....	56
Figura 5.30 - Legenda de preenchimento de cores .....	56
Figura 5.31 - Esquema de edição.....	56
Figura 5.32 - Editar legenda de cor .....	56
Figura 5.33 - Definição de intervalo de valores e cores para espessuras de camada betuminosa .....	57
Figura 5.34 - Representação dos desvios nas espessuras da camada de material betuminoso.....	57
Figura 5.35 - Representação das dispersões nas espessuras da camada de material betuminoso .....	57
Figura 5.36 - Definição de cores para desvio padrão de espessuras da camada betuminosa ..	57
Figura 5.37 - Definição de intervalo de valores e cores para espessuras de camada granular.....	58
Figura 5.38 - Representação dos desvios nas espessuras da camada de material granular.....	58
Figura 5.39 - Definição de cores para desvio padrão de espessuras da camada granular.....	58
Figura 5.40 - Representação das dispersões nas espessuras da camada de material granular. ....	58
Figura 5.41 - Corte no Revit. ....	59
Figura 5.42 - Visualização de corte no Revit.....	59
Figura 5.43 - Desvio no material betuminoso.....	60
Figura 5.44 - Desvio no material granular. ....	60
Figura 5.45 - Desvio na profundidade total.....	60
Figura 5.46 - Defeitos na profundidade total em 3D.....	61
Figura 5.47 - Caminho de circulação com escala de cores.....	62
Figura A1. 1– Passo 1 - Duplicação do material.....	70
Figura A1. 2– Passo 2 - Material duplicado.....	70
Figura A1. 3– Passo 4 - Alteração de cor.....	70
Figura A1. 4– Passo 3 - Padrão de preenchimento.....	70
Figura A1. 5 – Passo 5 - Alteração do nome da camada atual.....	71
Figura A1. 6– Passo 6 - Nome da camada atual.....	71
Figura A1. 7– Passo 7 - Camada granular (pedra).....	71
Figura A2. 1– Passo 1 - Renomear a primeira camada.....	71
Figura A2. 2 – Passo 2 - 2ª camada nomeada.....	72

Figura A2. 3 – Passo 3 - Inserir 2ª camada .....	72
Figura A2. 4 – Passo 4 - 2ª camada definida .....	72
Figura A2. 5 – Passo 5 - Definição da 2ª camada.....	72
Figura A3. 1 – Passo 1 - Corte em 2D do pavimento inicial .....	73
Figura A3. 2 – Passo 2 - Edição das camadas .....	73
Figura A3. 3 - Passo 3 - Duplicação da 1ª camada .....	73
Figura A3. 4 – Passo 4 - Eliminação da 2ª camada.....	73
Figura A3. 5 – Passo 5 - Definição da 2ª camada.....	73
Figura A3. 6 – Passo 6 - Corte em 2D do pavimento final com terreno natural .....	73
Figura B1. 1 – Caminho de circulação pavimentado ao longo de 400 m.....	74

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Influência das características funcionais nas exigências, adaptado de (Fontul, 2021). .....	26
Tabela 4.1 - Constante dielétrica de diferentes materiais (Ulriksen, 1982) citado por (Lopes, 2013).....	36
Tabela 5.1 - Medições com GPR de 1GHz.....	44
Tabela 5.2 - Afastamento entre a roda externa do trem de aterragem e a borda do caminho de circulação, adaptado de (OACI, ANEXO 14 - Volume I, 2016).....	45
Tabela 5.3- Largura das partes retilíneas do caminho de circulação, adaptado de (OACI, ANEXO 14 - Volume I, 2016). ....	45
Tabela B2. 1 – Rooms 1-27. ....	75
Tabela B2. 2 – Rooms 28-56. ....	75
Tabela B2. 3 – Rooms 57 - 92. ....	75
Tabela B2. 4 – Rooms 93 - 124. ....	75
Tabela B2. 5 – Rooms 125 - 154. ....	76
Tabela B2. 6 – Rooms 155 - 184. ....	76
Tabela B2. 7 – Rooms 215 - 244. ....	76
Tabela B2. 8 – Rooms 185 - 214. ....	76
Tabela B2. 9 - Rooms 275 - 304.....	77
Tabela B2. 10 - Rooms 245 - 274.....	77
Tabela B2. 11 - Rooms 303 - 334.....	77
Tabela B2. 12 - Rooms 335 - 364.....	77
Tabela B2. 13 - Rooms 455 - 484.....	78
Tabela B2. 14 - Rooms 425 - 354.....	78
Tabela B2. 15 - Rooms 455 - 484.....	78
Tabela B2. 16 - Rooms 425 - 454.....	78
Tabela B2. 17 - Rooms 485 - 500.....	78

## SIGLAS

<b>AECO</b>	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação.
<b>ANAC</b>	Autoridade Nacional de Aviação Civil.
<b>AOCI</b>	Organização Internacional da Aviação Civil.
<b>API</b>	Interface de Programação de Aplicações - <i>Application Programming Interface</i> .
<b>BIM</b>	Building Information Modelling
<b>CAD</b>	Desenho Assistido por Computador.
<b>CC</b>	Caminho de circulação.
<b>COBie</b>	Troca de Informação sobre Operações de Construção em Edifícios - <i>Construction Operations Building Information Exchange</i> .
<b>CPIC</b>	Comité de Informação de Projetos de Construção - <i>Construction Project Information Committee</i> .
<b>EBVT</b>	Estrada de baixo volume de tráfego.
<b>FWD</b>	Defletómetro de Impacto.
<b>GPR</b>	Ground Penetrating Radar - Radar de Prospeção - Georadar
<b>ICD/KPI</b>	Indicadores chave de desempenho - <i>Key Performance Indicators</i> .
<b>IFC</b>	Classes da Fundação da Indústria - <i>Industry Foundation Classes</i> .
<b>ISO</b>	Organização Internacional para a Normalização - <i>International Organization for Standardization</i> .
<b>LNEC</b>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
<b>LOD</b>	Nível de desenvolvimento.
<b>M&amp;E</b>	Monitorização e Avaliação - <i>Monitoring and Evaluation</i> .
<b>RIBA/IRAB</b>	Instituto Real dos Arquitetos Britânicos - <i>Royal Institute of British Architects</i> .

## SÍMBOLOS

$h$	altura.
$f$	frequência.
$f_a$	frequência de amostragem.
$\Delta x$	janela temporal.
$\varepsilon$	permissividade dialética.
$K$	permissividade relativa ou constante dialética.
$\varepsilon$	permissividade dialética.
$V$	velocidade.
$C$	velocidade de propagação da luz no vácuo.
$\lambda$	comprimento de onda.
$\Delta t$	intervalo de amostragem temporal.
$t$	tempo.



## INTRODUÇÃO

A caracterização do estado dos pavimentos aeroportuários - doravante designados por pavimentos - é uma tarefa essencial para a gestão da segurança e da operação e manutenção das infraestruturas aeroportuárias. A monitorização adequada de pavimentos durante o seu ciclo de vida é uma tarefa desafiante. Uma inspeção adequada pode levar a uma melhor compreensão das necessidades atuais e do estado de desempenho estrutural dos pavimentos. Por outro lado, uma avaliação detalhada dos danos nos pavimentos fornece informação fiável para evitar perdas económicas desnecessárias e garante a segurança e o conforto para o transporte de pessoas e bens (Fontul, 2019).

Nas últimas décadas, a importância da aplicação de ensaios não-destrutivos em diversas áreas da engenharia civil tem vindo a aumentar, principalmente no que concerne aos métodos baseados na propagação de energia eletromagnética de alta frequência, geralmente designada como Radar de Prospeção, Georadar, ou *Ground Penetrating Radar* (GPR) (na literatura inglesa).

O Radar de Prospeção é uma ferramenta de levantamento geofísico que pode ser usada em vários domínios, como geologia, engenharia civil, minas e meio ambiente. A sua aplicação consiste na deteção e localização de estruturas do subsolo, através da deteção de variações nas propriedades eletromagnéticas do meio, que dependem da composição do material (solo, rocha, betão, etc.), do teor em água e da densidade do material.

No sector das infraestruturas de transportes, nomeadamente nos pavimentos, o conhecimento do tipo de estrutura, materiais e da espessura das camadas que constitui o pavimento é essencial para a avaliação da capacidade de carga e defeitos ao longo dos anos, como um complemento aos resultados dos ensaios de carga e defeitos. Neste contexto, o Radar de Prospeção é particularmente útil, pois é capaz de fornecer informação de forma contínua (Fontul, et al., 2016).

Esta dissertação visa também contribuir para uma melhor sistematização da monitorização dos dados recolhidos do Caminho de Circulação - doravante designado por CC - realizada com Radar de Prospecção - doravante designado por GPR - com a utilização de *autodesk Revit*, que é uma das ferramentas do *software* BIM.

O modelo BIM, com base na ferramenta *autodesk Revit*, teve um papel preponderante para o caso de estudo desta dissertação na medida em que tornou mais fácil o tratamento dos dados fornecidos pelo GPR e trouxe outra forma de visualizar os desvios existente entre as camadas de pavimentos com o traçado a rigor do CC que não seria possível fazer com o GPR.

A fim de otimizar a aplicação deste equipamento, é importante conhecer as suas limitações de aplicação, dependendo dos estudos a realizar. Na presente dissertação descreve-se a metodologia adotada, apresentam-se alguns casos de estudo da aplicação do equipamento de GPR e referem-se algumas das dificuldades inerentes à utilização do GPR, juntamente com recomendações visando a otimização da sua utilização.

## 1.1 Enquadramento

Com o avanço tecnológico após a Segunda Guerra Mundial, os dispositivos de GPR começaram a ser estudados pelo seu potencial militar na identificação de objetos ou dispositivos no solo. Vários métodos de relativa facilidade de aplicação no campo começaram a ser desenvolvidos rapidamente, surgindo o interesse de outras áreas nestes processos. Este facto, juntamente com a crescente disponibilidade comercial dos equipamentos de radar, contribuiu significativamente para o início da sua aplicação na área de engenharia civil.

Atualmente, a nível nacional, com a existência de uma rede rodoviária e aeroportuária onde a grande maioria dos traçados previstos se encontram concluídos, ocorre uma mudança do foco nos objetivos de engenharia de pavimentos, sendo a principal preocupação a manutenção, a reabilitação e a mitigação, em vez da construção.

A manutenção preventiva a realizar em pavimentos constitui uma boa oportunidade para a utilização do GPR, tirando proveito das suas vantagens. A principal aplicação do GPR em pavimentos é a recolha de dados referentes à espessura das camadas ligadas e não ligadas da via e, conseqüentemente, os seus defeitos, ao longo de grandes extensões, de forma contínua e não destrutiva, com rapidez no processo e sem necessidade de interrupção do tráfego. Pelo contrário, um dos métodos tradicionais para a medição de espessura em pavimentos, a

extração de carotes, é um método destrutivo que implica a interrupção da via ensaiada e que apenas fornece informação pontual. A extração de carotes, embora sendo de fácil aplicação no terreno, não permite a recolha de informação sobre camadas de agregados não ligados, sendo morosa a sua realização em grande escala.

Em suma, o equipamento de GPR contorna os principais problemas dos métodos tradicionais, sendo a sua maior desvantagem a complexidade da interpretação dos dados medidas (Fontul, et al., 2018). Dada a importância do conhecimento das espessuras das camadas de pavimento e os seus defeitos para sua avaliação estrutural e funcional e atendendo ao facto de que o foco atual está dirigido para as atividades de manutenção e mitigação, pretende-se com este trabalho contribuir para uma menor interferência no tráfego durante a realização de ensaios para a deteção dos defeitos.

Neste sentido, pretende-se tirar partido das potencialidades do GPR e da evolução tecnológica que tem ocorrido, para além de estudar alternativas que levem à redução do número de ensaios destrutivos.

Uma avaliação adequada dos pavimentos rodoviários e, em particular, dos aeroportuários, torna-se essencial para proporcionar movimentos de trânsito seguro de pessoas e de mercadorias.

Além disso, uma rede de transportes fiável é um aspeto crucial do crescimento económico. Os pavimentos estão sujeitos a vários fatores que influenciam o desempenho global, por exemplo, carga de tráfego, temperatura, humidade, assentamentos, perda de ligação entre as camadas de misturas betuminosas, estado de subsuperfície, etc. Estes fatores podem reduzir a vida útil da infraestrutura e diminuir o conforto de circulação das aeronaves. Deste modo, é necessária a realização da inspeção atempada dos pavimentos e da otimização das metodologias de manutenção e reparação. Assim, é possível diminuir o custo de manutenção e, além disso, aumentar a duração de vida dos pavimentos aeroportuários. Assim, as técnicas não destrutivas são fortemente recomendadas para se conseguir uma informação valiosa do estado de subsuperfície.

Também é de referir que o GPR é um método geofísico não destrutivo e não invasivo ainda pouco utilizado na avaliação de infraestruturas, particularmente, em pavimentos aeroportuários, apesar das vantagens que apresenta, como: baixo custo de operação, economia de tempo e menor uso de mão-de-obra, embora a complexidade da sua interpretação requeira técnicos especializados.

Através da revisão bibliográfica, a capacidade do GPR para inspeção de pavimentos e avaliação da identificação de subsuperfície foi demonstrada e validada com sucesso em numerosos estudos e estudos de caso. Os futuros desafios relativos do GPR em pavimento pren-

dem-se com a aplicação de técnicas de processamento mais recentes para apoiar os gestores/operadores na tomada de decisões, com a aprendizagem da operação de máquinas e da aplicação de métodos inteligentes de análise de dados (Rasol, et al., 2022).

## 1.2 Objetivos

O objetivo da presente dissertação é contribuir para a monitorização e visualização em BIM de pavimentos com o GPR, através da utilização de técnicas mais recentes de integração da informação e de visualização, como o *Building Information Modelling* (BIM).

Com o intuito de atingir o objetivo mencionado e de fomentar os diferentes assuntos estudados nesta dissertação, começou-se por realizar uma pesquisa bibliográfica e análise da informação adquirida. Em paralelo, fez-se uma breve introdução e abordagem às infraestruturas aeroportuárias, para compreender melhor a sua constituição, funcionamento, ações a que se encontram sujeitas e suas degradações.

Foi dada uma atenção acrescida aos métodos de monitorização de pavimentos através do *Ground Penetrating Radar* (GPR) para deteção das espessuras de camadas. Numa fase seguinte, foram abordados: a metodologia de ensaio, o processamento de dados e a metodologia de integração da informação.

No sentido do cumprimento dos objetivos desta dissertação, foi necessário implementar os dados de avaliação e monitorização dos pavimentos aeroportuários no modelo digital, sendo estudada a forma mais eficiente para a sua visualização.

## 1.3 Metodologia

Com esta dissertação, propõe-se o estudo da adequabilidade da aplicação de um método de visualização de resultados e sua digitalização em BIM para avaliação de pavimentos com GPR e o desenvolvimento de um procedimento para a sua implementação. Para atingir estes objetivos foi utilizada a seguinte metodologia:

- Estudo dos conceitos e tipo de informação para fundamento e aplicabilidade do método;
- Realização de tentativas e ajuste da melhor forma de integração e visualização da informação das espessuras das camadas de misturas betuminosas do pavimento e comprovação do método de representação de dados;
- Comparação dos métodos de representação estudados e análise dos seus benefícios e inconvenientes para utilização na gestão da manutenção de pavimentos aeroportuários.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, sendo que o presente corresponde à introdução.

O capítulo dois, consiste numa abordagem geral sobre o modelo BIM, nomeadamente a sua origem, evolução histórica, utilidade, campo de aplicação e diferentes níveis, consoante o campo de aplicação pretendido até à sua aplicação no pavimento.

Em seguida, o capítulo três engloba uma breve descrição sobre pavimentos aeroportuários, especificamente os tipos de pavimentos, as suas exigências funcionais e estruturais e os métodos mais utilizados para deteção dos defeitos de camadas e monitorização.

No capítulo quatro é descrito de forma sucinta o funcionamento do GPR, explicando os princípios físicos relativos às ondas eletromagnéticas emitidas pelas antenas, bem como os princípios de reflexão das ondas. É ainda referida a origem do GPR, sua evolução histórica, utilidade, campo de aplicação, assim como uma breve descrição da avaliação de um pavimento flexível com recurso a GPR.

No capítulo cinco, faz-se uma breve descrição sobre o caso de estudo, os registos recolhidos GPR a ser aplicados no *autodesk Revit*, descrição sobre o modelo BIM, os procedimentos necessários para a execução do caso de estudo e os resultados obtidos, concluídos em conjunto com o GPR.

Finalmente, no capítulo seis, apresentam-se as conclusões e retiram-se inferências sobre o trabalho desenvolvido, bem como sugestões para trabalhos futuros a serem desenvolvidos nesta área.



## METODOLOGIA BIM

### 2.1 Considerações iniciais

No âmbito desta dissertação, pretende-se demonstrar a contribuição da aplicação do BIM na modelação e avaliação de um caminho de circulação aeroportuário em serviço.

Com esta metodologia, pretende-se demonstrar ainda que esta metodologia pode ser implementada em sistemas de gestão de infraestruturas aeroportuárias e rodoviárias, possibilitando o registo das suas características físicas e geométricas, bem como os dados de medição / monitorização dos pavimentos / vias, recolhidos a partir do Radar de Prospeção, e as intervenções realizadas ao longo de vida útil da infraestrutura (Lopes, et al., 2018).

O aparecimento dos computadores e a evolução da informática permitiram às mais variadas áreas automatizarem as suas atividades. Para o setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO), este avanço permitiu a génese de várias ferramentas de trabalho, nomeadamente o desenho assistido por computador (CAD - "Computer Aided Design") e alguns programas de cálculo automático baseados em elementos finitos são, na atualidade, ferramentas muito utilizadas neste setor. De facto, é possível a otimização dos sistemas de trabalho no setor AECO sempre que surgem novos desafios, tais como o aumento progressivo da complexidade dos projetos, a preocupação pela sustentabilidade e questões energéticas, a procura pela otimização dos custos, entre outros. Neste sentido, tem vindo a existir a necessidade de desenvolver uma metodologia que permita uma maior participação das várias especialidades transversais a cada projeto (Manico, 2018).

Neste sentido surge o *Building Information Modelling* (BIM), que é mais do que um modelo para visualização do espaço projetado: é um modelo digital composto por um repositório de dados que permite agregar informação para diversas finalidades, além de permitir o aumento de produtividade e racionalização do processo. As razões que o levam a ter um maior destaque em relação a outras ferramentas residem na facilidade com que é utilizado ao longo de todo o

projeto, permitindo a automatização do processo de criação da documentação nomeadamente desenhos de plantas, cortes, alçados, etc. Para além disso, o BIM contém elementos construídos virtualmente que podem ser usados de forma intuitiva nos diferentes projetos, permitindo identificar incompatibilidades antes da construção, aumentando a qualidade na construção e no processo de decisão.

Esta metodologia surge como a melhor estratégia de pensar ou trabalhar, que permite simular a realidade da construção ao mais pequeno pormenor, através de um modelo digital, englobando todos os requisitos solicitados pelo requerente (Dono de Obra). Nos modelos BIM encontramos os elementos de construção, os processos construtivos, o tempo, os custos, o planeamento de atividades, entre outra informação. Assim, este tipo de modelo, em relação aos simples modelos tridimensionais, consegue transcender a mera componente espacial, acoplando consigo uma base de dados interna onde é guardada a informação referente ao projeto, e com a qual é permitido agir de diversas formas e por diversos intervenientes. A modelação permite obter com elevado grau de rigor as características geométricas do objeto e, por outro lado, permite oferecer características técnicas, nomeadamente propriedades mecânicas, térmicas, acústicas, massa, disposição de armaduras, constituição dos materiais, informação sobre a localização espacial, disposição solar, informação do fabricante, entre muitos outros dados (Eastman, Chuck, et al., 2011).

## 2.2 Maturidade BIM

"BIM" é um termo que tem vindo a ser introduzido gradualmente na indústria da construção nas últimas décadas e é um dos desenvolvimentos promissores no setor AECO. Trata-se de uma metodologia que mostra mudanças muito significativas em relação à abordagem atual de projeto, construção e manutenção de infraestruturas. Para resolver alguns dos problemas do setor, o BIM leva ao uso de métodos coerentes de informação do projeto em relação à centralização de computadores. A tecnologia BIM compreende um conjunto de dados, relacionados a elementos paramétricos, a base do processo de modelação. Um elemento paramétrico é um objeto digital que contém, além dos parâmetros geométricos, várias características específicas das propriedades materiais e físicas. A especificação de Nível de Desenvolvimento (LOD) é uma referência que permite aos profissionais da indústria da AECO especificar e articular com um alto nível de clareza de conteúdo e confiabilidade os modelos 3D em vários estágios. A especificação LOD adiciona contexto em relação à alta transparência e confiabilidade dos modelos BIM, como resultado de várias fases da construção. Também define características dos elementos que compõem o modelo em diferentes especialidades de construção,

a fim de esclarecer os profissionais sobre possíveis limitações dos modelos que foram recebidos. No entanto, deve-se notar que o LOD não substitui um plano de implementação do projeto no BIM, mas deve ser usado como um plano. Na implementação do BIM, o setor da AECO é incentivado a apresentar uma maior transparência e colaboração entre fornecedores, aumentando positivamente a reputação do setor. Vários países têm vindo a adotar essa metodologia nos últimos anos, à medida que as questões de tecnologia e implementação melhoram e mudanças significativas são observadas com a implementação e o uso do BIM" (Silva, et al., 2020).

A forma mais eficaz de compreender a implementação do BIM é a utilização de Diagrama de Maturidade BIM, ver Figura 2.1.

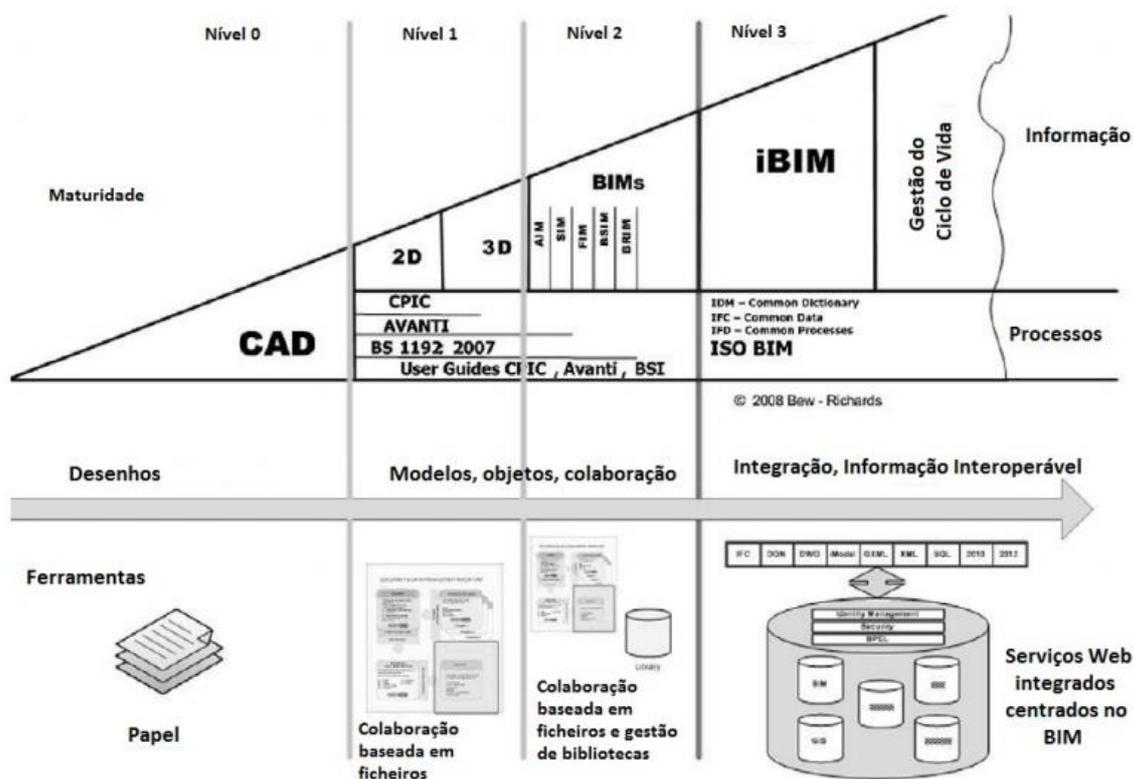


Figura 2.1 - Diagrama de Maturidade BIM, adaptado de (Bilal, 2010) e citado por (Carvalho, 2016)

É importante notar que o diagrama reconhece o impacto que tanto os dados como a gestão do processo têm sobre a metodologia BIM. Deste modo, será apresentado um breve resumo de cada nível do modelo.

Nível 0 – Este nível de maturidade, tal como é definido por este diagrama, compreende a utilização de ficheiros CAD 2D para informação de produção: um processo que na maioria

das práticas de projeto tem sido utilizado há muitos anos. O ponto importante a ser extraído do diagrama (a partir da linha horizontal que separa os dados e a gestão do processo, que se inicia apenas o nível 1) é que as normas e os processos são comuns em relação aos dados e processos e a utilização de CAD não consegue ser impulsionada para um CAD desenvolvido.

Nível 1 – Neste nível de maturidade observa-se uma utilização crescente de informação 2D e 3D em projetos. Para os arquitetos, o *software* 3D tem sido cada vez mais utilizado como ferramenta de desenho conceptual durante as fases iniciais do projeto e para visualização do projeto finalizado na apresentação ao cliente. Esta forma de BIM, onde apenas são utilizados em parte os benefícios do modelo é frequentemente referida como 'BIM solitário', isto é, o modelo BIM não é utilizado em colaboração entre os membros da equipa. A utilização de ferramentas 3D para além desta fase tem sido normalmente limitada a grandes projetos de infraestruturas. Em tais projetos, a utilização de modelos 3D por clientes comerciais está também a tornar-se mais comum. Os maiores empreiteiros de instalações mecânicas e elétricas abraçaram o BIM para aplicar os seus processos de conceção, utilizando verificações suplementares realizadas com *software* proprietário para assegurar que as questões de coordenação são resolvidas durante a fase de conceção. Este é um passo significativo em direção ao objetivo de minimizar desperdícios e ineficiências nos atuais processos de conceção e construção. Em termos de processos, o nível 1 engloba a necessidade dos processos de gestão se situarem a par dos processos de conceção. Os consultores e gabinetes maiores iniciam o trabalho em simultâneo, com projetos BIM de nível 1, e estabelecem novos processos para a gestão da informação que estão agora incorporadas na norma ISO 19650 - Organização e digitalização de informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo o BIM - Gestão de informação utilizando o BIM.

Nível 2 – Neste nível são produzidos modelos de informação 3D por todos os membros-chave da equipa de projeto integrado. No entanto, a produção de modelos de informação em 3D é necessária, não precisando estes modelos de coexistir num único modelo. Ao compreender e utilizar a norma ISO 19650, os projetistas podem assegurar que o modelo de cada especialidade progride de uma forma lógica antes de ser utilizado por outra especialidade ou por um empreiteiro. Não se prevê que as questões legais, contratuais ou de seguros, atualmente utilizadas pela indústria, se alterem para o nível 2, mas é justo dizer que o nível 2 de maturidade BIM expõe algumas das deficiências do atual contrato de informação. Por exemplo, o papel do BIM *Manager* precisa de ser considerado assim como os papéis e as responsabilidades dos vários projetistas e partes contratantes precisam de ser mais claras, nomeadamente em

relação aos níveis de desempenho especificados. Os resultados requeridos em cada fase exigirão também uma maior definição, e por sua vez tal exigirá que o Coordenador do Projeto esclareça os *inputs* necessários em cada fase, a fim de gerir o projeto à medida que este avança. No nível 2 de maturidade BIM é exigido que a fragmentação da equipa de projeto seja substituída por equipas integradas que trabalham em colaboração sob novas formas e métodos de trabalho.

Nível 3 - Os maiores desafios do BIM surgem quando se passa do nível 2 para o nível 3 e se passa a uma perceção do modelo de projeto único. Com o nível 2 é possível resolver a metodologia de todos os projetistas que trabalham em 3D. Assim, o desafio com o modelo único, não será a utilização colaborativa da informação, mas sim o aproveitamento dessa informação no modelo para que seja de maior utilidade. No sentido de a informação ter mais valor, será necessário a utilização de *software* em interoperabilidade, como reconhece o Diagrama de Maturidade BIM (ver caixa sob iBIM). Com o BIM de nível 3 será possível: i) a análise precoce do projeto sobre o desempenho ambiental, minimizando o tempo de projeto iterativo; ii) modelos de custos a serem rapidamente derivados do modelo, utilizando novas interfaces de custos; iii) aspetos de saúde e segurança, associados à construção e manutenção do edifício, a serem analisados em paralelo com o desenho; iv) gestão de ativos, indicadores de desempenho e outra informação a serem alinhados em conjunto e de forma inteligente, permitindo a incorporação de dados no modelo, a desenvolver durante a conceção e a serem utilizados para informar e melhorar projetos futuros.

Os processos de conceção terão de ser desenvolvidos até ao seu próximo nível de aperfeiçoamento, de modo que haja clareza e estabelecimento de métodos que definam quantas partes podem trabalhar no mesmo ambiente do modelo ao mesmo tempo. Estes processos, alinhados com um melhor âmbito de serviço e documentos de responsabilidade, dissiparão os receios de alguns processos legais ou observadores de seguros, mas há que reconhecer que existem implicações e questões legais associadas aos direitos de autor. As responsabilidades e o âmbito dos serviços precisam de ser identificados e considerados mais profundamente para que o nível 3 seja bem sucedido.

Um dos maiores desafios da indústria relacionar-se-á com a formação, particularmente em relação ao trabalho em equipa e às abordagens colaborativas relativamente à conceção e à construção, sendo que a próxima geração de projetistas e empreiteiros a trabalhar em colaboração irá ter necessidade de abraçar novos métodos de trabalho e deixar para trás alguns velhos pressupostos e estereótipos funcionais (Sinclair, 2012).

## 2.3 Dimensões BIM

O BIM é uma metodologia emergente que oferece uma nova abordagem ao processo de controlo e gestão de toda a informação criada e desenvolvida na fase de projeto pelas várias especialidades e por todas as partes interessadas durante o ciclo de vida da construção, através da criação de modelos digitais. As ferramentas baseadas na metodologia BIM permitem a automação de todos os elementos que constituem um projeto de construção / reabilitação, a deteção de erros nos projetos existentes e a análise de incompatibilidades entre as diferentes especialidades, permitindo a partilha de informação, evitando assim a reprodução dos mesmos dados (Paiva, Aguiar, Pinho, 2006; Mahdjoubi, Moobela, Laing, 2013), citado por (Silva, et al., 2020).

Assim, o BIM representa o conceito de modelação e integração de grande parte da informação de projeto num modelo virtual tridimensional do edifício, sendo que este conceito vem ganhando cada vez maior popularidade à medida que as empresas de *software* apostam no desenvolvimento de modelos cada vez mais completos e robustos, e dedicam um esforço cada vez mais significativo na divulgação e promoção dos seus produtos (Peças, 2021).

Os modelos BIM permitem a inserção de informação em diferentes dimensões de atuação, ver Figura 2.2. Para além do 3D BIM - modelo tridimensional, existe o 4D BIM - cronograma e planeamento, o 5D BIM - orçamentação, o 6D BIM - sustentabilidade, o 7D BIM - gestão das instalações, o 8D BIM - segurança, o 9D BIM - *lean construction* (construção enxuta) e o 10D BIM - construção industrializada (Darós, 2017).



Figura 2.2 - Dimensões do BIM, do 3D ao 10D (Darós, 2017)

Atualmente, as ferramentas de desenho utilizadas pelo BIM deixaram de ser elementos manualmente inseridos pelo utilizador, passando a elementos paramétricos em que as suas propriedades só podem ser alteradas se for constituída uma nova instância do objeto ou, em

casos mais extremos, uma nova família de elementos. Desta forma, enquanto no desenho 3D CAD tradicional todos os aspetos da geometria de um elemento devem ser editados manualmente pelos utilizadores, a forma e a geometria de montagem de um modelador paramétrico [com o qual é possível detetar automaticamente as incompatibilidades do projeto] ajustam-se automaticamente às alterações contextualizadas pelo utilizador (Eastman, Chuck, et al., 2011). Segundo (Waldeck Consulting, 2016) citado por (Manico, 2018), a existência de condições da terceira dimensão (3D) são o varrimento a laser e as medições com GPR. A segurança e logística do modelo proposto prende-se com a animação, renderização e passeios virtuais, análise e deteção de conflitos no modelo, e precisão a laser para desenvolvimento de *layout* orientado por um campo BIM.

No modelo BIM pode ser incorporada a calendarização das atividades, nomeadamente o planeamento da construção, que é realizado pela quarta dimensão (4D). A simulação das fases do projeto pode incluir: cronograma enxuto, acompanhamento do planeamento, monitorização da entrega de equipamentos e materiais, detalhe e simulação das instalações, *Just In Time (JIT)* na entrega dos equipamentos e validação visual para aprovação de pagamentos. Os modelos 4D BIM trazem uma nova abordagem ao planeamento e controlo da obra, sendo considerada uma abordagem superior aos métodos mais tradicionais. As melhorias mais significativas registam-se ao nível da visualização, com os modelos 4D BIM a contribuírem para a clarificação da sequência de construção e para a diminuição da ambiguidade na perceção de constrangimentos especiais. A exploração de cenários "What-if" antes da execução dos trabalhos, isto é, a experimentação de diversas soluções, é outra aplicação possível para a quarta dimensão (4D) (Peças, 2021).

Depois das atividades estarem definidas no modelo, associam-se então os custos, comumente designados por orçamentação, alcançando assim a quinta dimensão (5D). Quanto a esta dimensão, a conceção do projeto e folha de orçamento são feitos em tempo real, bem como a extração de dados qualitativos para suporte detalhado de custo de estimativa. A verificação de mercado a partir de modelo fabricado pode incluir: Estrutura metálica, Instalações hidráulicas ou Instalações elétricas. Esta dimensão permite ainda a valorização de: Cenários hipotéticos, Visualizações, ou Extração de quantidades. Ao nível das soluções pré-fabricadas, podem ser orçamentados: Equipamento dos ambientes, Sistema MEP, Pré-fabricação multicomercial, ou Arquitetura e estrutura em elementos únicos.

A sexta dimensão (6D) estabelece análises de consumo energético, resultando em estimativas de energia mais precisas logo no início do projeto, permitindo, em termos de sustentabilidade, potenciar uma construção mais ecológica. Esta dimensão está baseada na sustentabilidade e controlo energético, análise de soluções energéticas, análise de deteção de energia, certificação sustentável e análise de consumo.

A sétima dimensão (7D) é utilizada pelos gestores de operação e manutenção de edifícios ou infraestruturas durante o seu ciclo de vida, com base em toda a informação necessária para a devida gestão dos elementos de projeto - nomeadamente, estado dos componentes, especificações técnicas, manuais de operação, datas de garantia, etc.; sendo que tornam, por isso, a substituição de um determinado elemento muito mais eficiente (Manico, 2018). Esta dimensão, pode incluir um sistema de monitorização aplicado, uma estratégia do ciclo de vida em BIM e *BIM AS-Built*. O manual do proprietário incorporado ao sistema BIM pode contemplar: Sistema COBie que extrai informação quanto ao status dos componentes; Plano de manutenção e suporte técnico; e Sistema de hospedagem de arquivo BIM para troca digital de informação.

A oitava dimensão (8D) no modelo BIM diz respeito à segurança e prevenção de acidentes no campo de trabalho. De acordo com o estudo feito por Imriyas Kamardeen (2010), podem-se considerar três aspetos nesse contexto: determinar os riscos no modelo, promover sugestões de segurança para perfis de alto risco e propor o controlo de riscos e de segurança do trabalho na obra para os perfis de riscos incontrolláveis. Ou seja, o BIM 8D adiciona a dimensão segurança ao modelo, através da previsão de possíveis riscos no processo operacional e construtivo, bem como acrescenta elementos de segurança e indicativos de riscos (Darós, 2017).

A nona dimensão (9D) do modelo é utilizada para a conclusão efetiva do processo BIM como parte da estrutura de produção no setor de construção e uso da digitalização. Em suma, a adoção da mentalidade *lean* oferece muitos benefícios para todas as partes envolvidas, reduzindo os custos a ajudando ao foco na eliminação de desperdícios, consequentemente reduzindo também o tempo de ciclo do processo (Darós, 2017). A falta de planeamento em obras pode, de facto, levar a atrasos na entrega da obra e a aumentar o valor inicialmente orçamentado. O BIM 9D é o método concebido para eliminar desperdícios, minimizar os resíduos produzidos na obra, otimizar todos os recursos envolvidos no processo de execução e aumentar a produtividade. Todos esses aspetos contribuem para a criação de um produto final sustentável (Biblus, 2022).

Por fim, a décima dimensão BIM (10D) visa a industrialização dos processos do setor da construção para torná-lo mais produtivo, graças às novas tecnologias e à digitalização dos processos. A construção industrializada é a chave para solucionar a improdutividade no setor da construção e otimizar cada fase do ciclo de vida da obra: projeto, construção e gestão de infraestrutura ou equipamentos. Nesse sentido, o BIM 10D funciona como uma ferramenta que centraliza os dados para otimizar todas as atividades do projeto usando a tecnologia. Isso faz com que os *Project Managers* (Gestores de projeto) possam dispor de recursos intuitivos para realizar o projeto da melhor maneira possível. A construção industrializada, de facto, permite ter uma visão completa para a gestão de um ativo (nas fases de projeto, construção e manutenção). Portanto, pode ser utilizado para alinhar os setores financeiro, comercial, ambiental, da segurança e da análise de risco, entre outros. Nesse contexto, um *software* 10D BIM oferece inúmeras possibilidades para qualquer tipo de trabalho e pode ser utilizado em cada fase do projeto, graças ao apoio de tecnologias altamente inteligentes e recursos digitais que automatizam até as tarefas mais complexas (Biblus, 2022).

## 2.4 Interoperabilidade

A interoperabilidade é uma característica de um produto ou sistema, cujas interfaces são completamente compreendidas, para trabalhar com outros produtos ou sistemas, presentes ou futuros, na implementação ou no acesso, sem quaisquer restrições. Em relação ao *software*, o termo interoperabilidade é utilizado para descrever a capacidade de diferentes programas trocarem dados por meio de um conjunto comum de formatos de troca, de ler e gravar os mesmos formatos de ficheiro e de usar os mesmos protocolos (Grani, 2016).

A interoperabilidade para o BIM estrutural tem usualmente duas perspetivas. A primeira é considerada como externa à organização, na qual a interoperabilidade e a colaboração são feitas com organizações externas, das várias especialidades como a Arquitetura, as Instalações Especiais e outras. Por esta via existem vários modelos 3D por disciplina, que se interligam num modelo federado (Knittle, 2014), ver Figura 2.3.

Neste contexto, a interoperabilidade entre sistemas pode ser assegurada através do ficheiro universal, Classes da Fundação da Indústria (Industry Foundation Classes - IFC), por ficheiros compatíveis ou por ficheiros do mesmo sistema de modelação BIM das diversas disciplinas. A segunda perspetiva é considerada como interna e refere-se a um sistema de modelação BIM que pode interagir, por exemplo com um sistema de análise de cálculo estrutural, através de um Interface de Programação de Aplicações (*Application Programming Interface - API*) ou *plugins* instalados no sistema de modelação BIM.



Figura 2.3 - Interoperabilidade entre modelos BIM de diferentes disciplinas (Knittle, 2014), citado e adaptado por (Caeiro, 2021)

Na segunda perspectiva as limitações surgem quando se utilizam diferentes *software* de diferentes empresas; quando o *software* é o mesmo e da mesma empresa, a compatibilidade é mais elevada e o fluxo de trabalho é mais eficiente. O *software* utilizado deve permitir a transferência de informação da geometria paramétrica existente dos objetos inteligentes específicos para o *software*, utilizando as interfaces correspondentes. Finalmente, uma boa estratégia de troca de dados em conformidade com o *software* utilizado poderá permitir a integração do dimensionamento estrutural no processo BIM (Rustler, 2017).

Na primeira perspectiva existem evidentes limitações, relacionadas com a interoperabilidade entre os diversos sistemas com o ficheiro IFC. Todavia, mesmo que existam problemas de interoperabilidade, durante a partilha e troca de dados baseados em IFC, não se pode concluir que o processo da interoperabilidade não é viável (Lai, et al., 2018).

*Industry Foundation Classes* (IFC) é uma plataforma criada pela *Building SMART* para partilha de informação entre membros da equipa de projeto através de múltiplas aplicações de *software* que são usadas para o design, construção, aquisição de materiais, manutenção e operação ao longo do ciclo de vida de uma edificação (building SMART, 2015), citado por (Carvalho, 2016).

O formato IFC é um modelo de informação neutro criado para facilitar a interoperabilidade na indústria da construção, pois permite que diferentes aplicações de *software* troquem e partilhem informação relevante.

O papel do IFC é descrever toda a informação associada com um edificado ao longo do seu ciclo de vida e servir de base para as trocas e partilhas de todo o tipo de informação. O modelo IFC permite inúmeras formas de definir objetos do edifício, processos e outros tipos de informação num esquema de informação disponível publicamente (Eastman et al. 2011) citado por (Carvalho, 2016).

O IFC foi desenvolvido para criar um conjunto largo de representações de dados da informação da construção para trocas entre aplicações utilizadas pelos intervenientes no setor da AEC. Este formato tem, contudo, limitações e os utilizadores devem entender as possibilidades e limitações dos diferentes *software* em trocas de dados baseadas no formato IFC (Hietanen e Final, 2006), citado por (Carvalho, 2016). Apesar disso, o formato IFC tem-se afim a norma internacional para trocas de informação e integração na indústria da construção civil (Eastman et al. 2011) citado por (Carvalho, 2016).

O formato IFC proporciona uma norma comum para troca e partilha de informação eletrónica acerca da construção, mas é insuficiente sozinho, uma vez que não descreve processos individuais dentro do ciclo de vida do edificado ou fornece a informação necessária para os completar (Smith e Tardif 2009) citado por (Carvalho, 2016). É necessário definir requisitos e protocolos para a troca e partilha de informação e é preciso que o *software* incorpore normas padrão para trocas de informação fidedignas (Carvalho, 2016).

Segundo (Khemlani, 2011) citado por (Carvalho, 2016), em setembro de 2000 foi lançado o projeto de verificação de projetos, o *e-PlanCheck*, baseado no formato aberto IFC para suportar a interoperabilidade entre as aplicações usadas para o desenho, construção e operação dos edifícios pelos indivíduos das diferentes disciplinas.

## 2.5 BIM em reabilitação de infraestruturas

Segundo (Ghassemi, Becerik-Gerber, 2011); Lino, Azenha, Lourenço, 2012), citado por (Silva, et al., 2020), "os principais desafios da implementação do BIM na reabilitação estão relacionados com a modelação dos elementos únicos que a constituem, exigindo um esforço de trabalho acrescido na modelação da informação incorporada nos objetos BIM e uma constante necessidade de atualizar essa mesma informação".

Conforme (Penttila, Rajala, Freese, 2007), citado por (Silva, et al., 2020), "de facto, em projetos de reabilitação, a modelação deixa de recair sobre os elementos novos, passando a corresponder a criação de modelos *as-built* ou "como construídos", correspondentes ao modelo do existente, com toda a informação e as características associadas ao estado inicial da construção incorporada, devendo também a informação sobre as fases de manutenção, remodelação ou demolição estar associadas". "Cada projeto de reabilitação é único e apresenta problemas e dificuldades individuais na modelação (incluindo para fases de demolição e/ou reconstrução), pelo que a incorporação da metodologia BIM se torna vantajosa na medida em que permite a monitorização das incompatibilidades que ocorrem e antecipar eventuais obstáculos" (Silva, et al., 2020).

A aplicabilidade prática do conceito BIM nestes casos busca enfatizar a definição de elementos e a representação de informação por meio de metodologias mais rápidas e de maior natureza organizacional, resultando na otimização da infraestrutura e aumentando os seus níveis de segurança, qualidade e custo. Nesse sentido, é importante entender, a priori, as metodologias de inspeção e monitorização de infraestruturas existentes e entender como os dados podem ser estruturados para o estabelecimento de um modelo de registo da informação em bases de dados estruturadas por objetos.

No caso de (Manico, 2018), a primeira fase do trabalho é baseada nos principais aspetos das campanhas de avaliação de pavimentos rodoviários, implementadas em um estudo de caso de um pavimento rodoviário em serviço, tendo sido concebido em ambiente BIM, onde é apresentado o potencial dessa ferramenta na monitorização da condição dos pavimentos. Os dados resultantes das campanhas de avaliação são monitorizados, visando entender a evolução dos diferentes componentes dos pavimentos e perspetivar intervenções de reabilitação. Neste sentido, foram modeladas diferentes intervenções, começando com a remoção das camadas existentes e a reconstrução da nova estrutura do pavimento, ver Figura 2.4. Esse processo possibilitou o cálculo da quantidade de cada material removido e sobreposto e, se disponível, o cálculo dos custos desses materiais (Silva, et al., 2020).

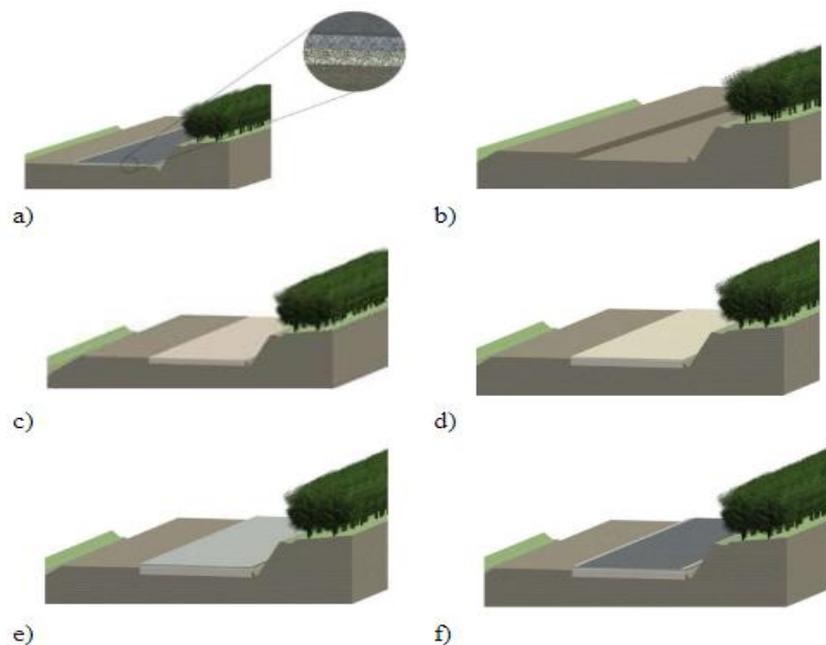


Figura 2.4 - Modelação das várias fases da intervenção de reabilitação empreendida na seção de controlo: a) Estrutura de pavimento existente; b) Remoção das camadas de pavimento; c) Camada de reforço de sub-base; d) Construção da camada de sub-base; e) Construção da camada de base; f) Nova estrutura de pavimento após intervenção (Silva, et al., 2020)

No que se refere a infraestruturas ferroviárias, são apresentados dois casos de estudo: i) um durante a construção de uma nova linha e; ii) outro antes e depois da renovação total de uma linha existente. O primeiro caso de estudo visa refletir o controle de qualidade durante a construção de uma nova linha. A modelação em BIM permite controlar a qualidade do trabalho durante a construção e a sua evolução ao longo do tempo. Neste caso, foi estudada uma zona de transição, ver Figura 2.5, que representa a secção mais sensível da ferrovia à ocorrência de assentamentos ao longo do tempo (Silva, et al., 2020).

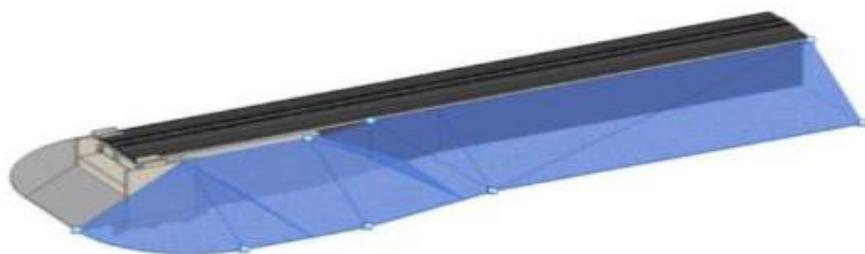


Figura 2.5 - Modelo BIM de zona de transição da via-férrea (Silva, et al., 2020)

Na Figura 2.6, apresenta-se, em modelo BIM, a evolução dos assentamentos na camada de balastro durante os primeiros três anos após a abertura ao serviço e circulação de comboios da nova linha estudada. A informação obtida é clara e objetiva, permitindo verificar a evolução registada no tempo, que, conforme se pode concluir, foi diferente no lado esquerdo e no lado direito da via-férrea (Silva, et al., 2020).

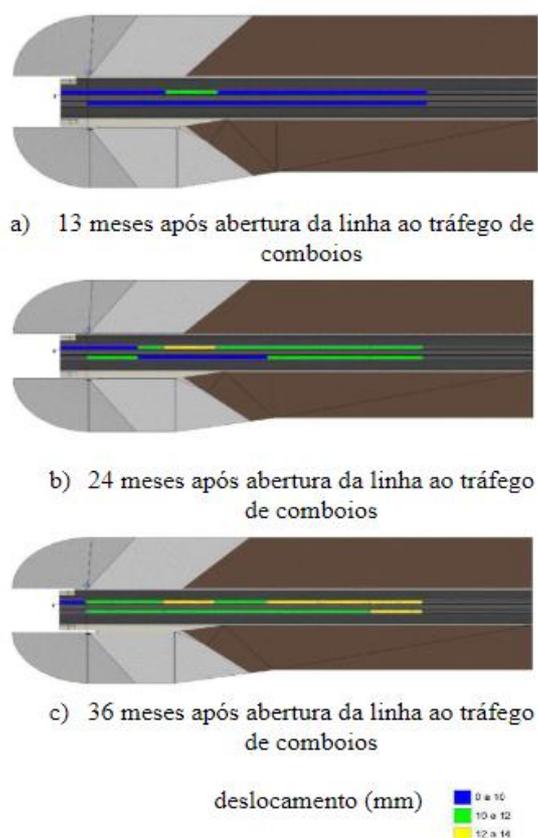


Figura 2.6 - Modelação BIM de assentamentos na camada de balastro nos primeiros três anos de serviço (Silva, et al., 2020)

## 2.6 Considerações finais

Neste capítulo, foi feita uma descrição geral sobre a metodologia BIM, bem como a sua utilidade, funcionamento e campos de aplicação, em particular nas infraestruturas. O BIM tem sido mais aplicado em edifícios, mas também é pertinente a sua aplicação em infraestruturas nomeadamente pavimentos rodoviários e vias ferroviárias, para incluir dados de monitorização obtidos com GPR.

Para (Bryde, Broquetas, Volm, 2013), citado por (Silva, et al., 2020), existe, no entanto, um conjunto de barreiras e limitações que estão a dificultar a implementação do BIM na prática profissional. A maioria das condições de natureza técnica tem vindo a ser gradualmente ultrapassadas, mas são os problemas centrados nas pessoas e nas organizações que colocam os maiores desafios à adoção do BIM, nomeadamente a mudança de procedimentos e fluxos de comunicação, prestação de contas e confiança, que apresentam, na grande maioria das situações, grande oposição.

Seguindo o exemplo de outros países, (Falcão Silva, et al., 2015) sustenta que a difusão da utilização do BIM para a realidade portuguesa trará num futuro próximo:

- i) Melhor visualização;
- ii) Aumento da produtividade devido a fácil estruturação de informação;
- iii) Maior organização dos documentos da construção;
- iv) Incorporação e vinculação de informação vital, tal como fornecedores de materiais específicos, localização de detalhes e quantidades necessárias para a estimativa e apresentação de propostas;
- v) Aumento da velocidade de entrega;
- vi) Redução de custos;
- vii) Abordagem do que está a acontecer nos chamados "países mais desenvolvidos" e, conseqüentemente, criação de um grande potencial para o desenvolvimento da indústria da construção e áreas afins.

No entanto há desafios que devem ser ultrapassados, como a falta de procura do BIM, as práticas atuais de projeto (2D e 3D) e a necessidade de recursos qualificados para BIM. Para (Silva, et al., 2020), apesar dos desafios a superar, podem ser identificadas estratégias no sentido de fomentar a difusão e generalização da utilização do BIM na indústria da construção em Portugal nos próximos anos, como:

- i) Imposição do BIM por parte do setor público;
- ii) Divulgação de casos BIM de sucesso;
- iii) Minimizar impedimentos e incentivar a adoção do BIM;
- iv) Desenvolver competências em BIM.

### 3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, pretende-se fazer uma descrição geral sobre a constituição e tipos de pavimentos, com especial destaque para o pavimento flexível, por se tratar do tipo de pavimento aeroportuário mais utilizado em Portugal.

Pretende-se abordar igualmente as suas exigências estruturais e funcionais e ainda, os métodos para a sua monitorização e deteção das suas degradações.

Os pavimentos rodoviários e aeroportuários são constituídos por estruturas de materiais mais resistentes que o terreno natural depois de nivelado, capazes de suportar durante períodos significativos as ações dos agentes atmosféricos e as cargas do tráfego e de transmitir essas cargas degradadas ao terreno. A principal função de um pavimento é a de constituir uma superfície livre e desempenada, destinada à circulação de veículos e aeronaves em condições adequadas de segurança, conforto e economia (Fontul, 2021).

Os pavimentos estão divididos em três tipos: rígidos, semirrígidos e flexíveis. A escolha do pavimento depende do tipo de tráfego de projeto, dos materiais disponíveis para utilização e das condições climáticas as quais será submetido (Brito, 2022).

### 3.2 Constituição de pavimentos

Os pavimentos flexíveis tem como principal característica o facto de rigidez das camadas diminuir em profundidade (Figura 3.1). Estes pavimentos caracterizam-se por terem camadas de base e de sub-base em materiais granulares não ligados, sobre as quais assenta um tratamento superficial ou uma ou mais camadas de misturas betuminosas com espessura total inferior a 0,15 m (Figura 3.2). Em estradas em itinerários principais e autoestradas, a camada de base pode ser constituída por misturas betuminosas. Este tipo de pavimentos é também utilizado em aeroportos, tanto nas pistas como nos caminhos de circulação, sendo constituído em Portugal por camadas betuminosas com espessuras entre 150 e 450 mm, aplicadas sobre camadas granulares não ligadas.

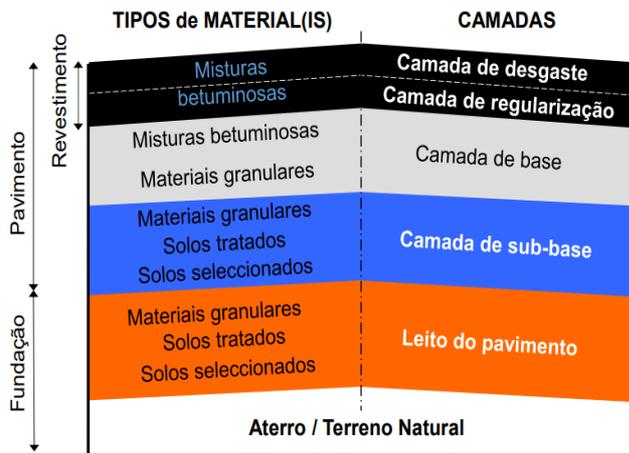


Figura 3.2 - Estrutura de pavimentos flexíveis (Fontul, 2021)



Figura 3.1 - Carote em mistura betuminosa (Fontul, 2021)

Os principais mecanismos de degradação dos pavimentos flexíveis e semirrígidos, devem-se à ação do tráfego (Figura 3.3), como fendilhamento das camadas betuminosas e deformações permanentes, conjugadas com as ações climáticas e deficiências de formulação das misturas betuminosas e colocação em obra, como degradações de superfície, nomeadamente desagregação, exsudação de betume, polimentos dos agregados, ninhos e peladas (Fontul, 2021).

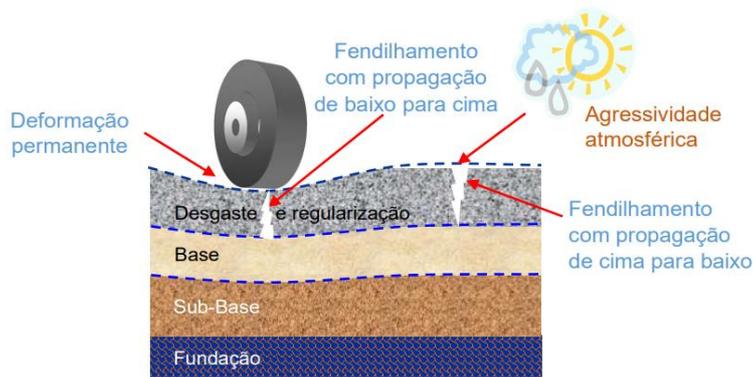


Figura 3.3 - Degradação estrutural dos pavimentos flexíveis (Fontul, 2021)

Nos pavimentos semirrígidos, o principal elemento estrutural é uma camada de base tratada com cimento (Figura 3.4). Esta camada é constituída por um material granular tratado com ligante hidráulico ou pozolânico ou por betão de cimento. O pavimento é constituído por uma ou mais camadas de misturas betuminosas (camada de desgaste e de regularização), uma

camada de base tratada com ligante hidráulico e uma sub-base geralmente em material granular (Figura 3.5).

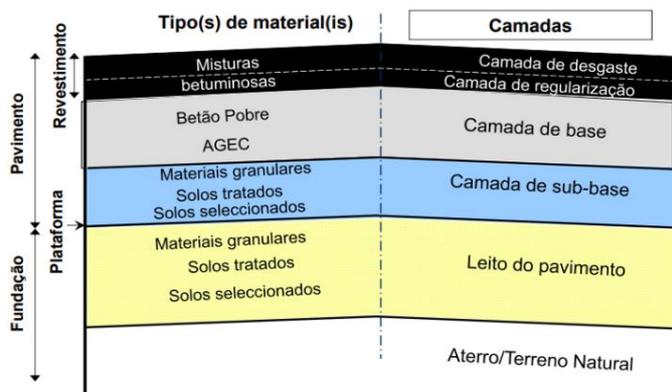


Figura 3.4 - Estrutura de um pavimento semirrígido (Fontul, 2021)



Figura 3.5 - Carote de um pavimento semirrígido (Fontul, 2021)

Nos pavimentos rígidos, o principal elemento estrutural é uma camada de betão de cimento, que desempenha simultaneamente a função de camada de desgaste. Um pavimento rígido é constituído por uma laje de betão, que pode ser colocada diretamente sobre a fundação ou sobre uma ou mais camadas de suporte que podem ser ou não tratadas com ligante hidráulico (Figura 3.6). Neste tipo de pavimento, a laje de betão desempenha simultaneamente as funções de camada de desgaste e de camada de base. A camada de apoio, geralmente em betão pobre, tem como principal função proporcionar à laje de betão uma superfície de apoio adequada e facilitar a sua construção.

Existem diversos tipos de pavimentos rígidos, designadamente (Jimenez, 2010):

- Pavimentos de betão simples com lajes curtas, com dimensões de 3 a 5 m, e juntas com ou sem dispositivos de transferência de cargas (passadores).
- Pavimentos de betão armado contínuo (BAC) (Figura 3.7).
- Pavimentos de betão pré-esforçado.

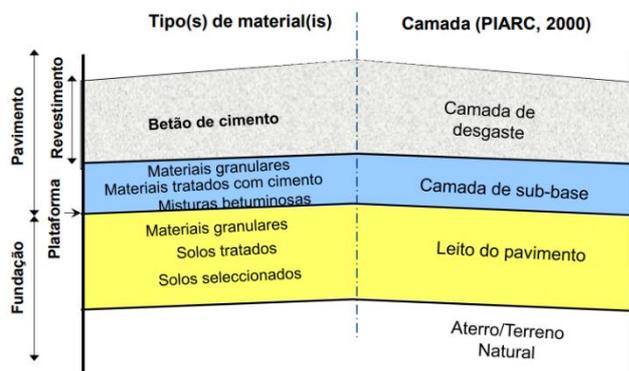


Figura 3.6 - Estrutura de pavimentos rígidos (Fontul, 2021)

Figura 3.7 - Carote de um pavimento rígido (Fontul, 2021)

Nos pavimentos rodoviários a camada de desgaste é constituída por um betão de cimento de elevada resistência. Pela sua maior rigidez, estas camadas distribuem as cargas verticais sobre uma área maior que as camadas betuminosas (Fontul, 2021).

Jimenez (2010), refere que, o mecanismo de degradação considerado para efeitos de dimensionamento deste tipo de pavimentos é o fendilhamento por fadiga da laje de betão. No entanto, não é este o tipo de degradação mais frequente nos pavimentos rígidos, mas sim as degradações de superfície, que afetam essencialmente as condições de circulação dos veículos. Estes defeitos estão associados ao estado das juntas, ao estado da superfície do betão e aos deslocamentos entre lajes adjacentes (escalonamento). Pode ainda ocorrer fendilhamento de retração nas lajes de betão quando há atraso na serragem das juntas, bem como fendas de canto devido ao deficiente apoio das lajes.

### 3.3 Exigências estruturais e funcionais

Quanto a exigência estrutural, os pavimentos rodoviários e aeroportuários deverão possuir determinadas características estruturais que lhes confirmam capacidades de carga suficiente para o tráfego a que se destinam. Sob os efeitos da passagem dos rodados sobre a sua superfície, em particular os veículos pesados e aeronaves, as estruturas dos pavimentos danificam-se progressivamente até se chegar a uma condição de ruína estrutural se, entretanto, não forem tomadas medidas de conservação adequadas (Fontul, 2021).

Relativamente a exigência funcional, a superfície dos pavimentos deve possuir determinadas características, de entre as quais se destacam a regularidade geométrica, a aderência e a capacidade de drenagem de águas superficiais. Estas características, que afetam diretamente o utente da estrada, designam-se por características funcionais e são apresentadas na Tabela

3.1. Atualmente é dada também crescente importância a aspectos de natureza ambiental que afetam, não só o usuário da estrada, como também a sua envolvente, tais como a mitigação do ruído induzido pelo tráfego ou aspectos paisagísticos (Fontul, 2021).

Tabela 3.1 - Influência das características funcionais nas exigências, adaptado de (Fontul, 2021)

		Exigências Funcionais				
		Segurança	Conforto	Economia	Meio Ambiente	
Características Funcionais	Aderência		XXXX		XX	X
	Regularidade	Longitudinal	XX	XXXX	XXX	XX
	-	Transversal	XXX	XX	X	
	Resistência ao rolamento				XX	
	Ruído pneu/pavimento			XXX		XXXX
	Propriedades refletoras		XX	XX	XX	

Influência Determinante	Influência Significativa	Influência Moderada	Pouca Influência
XXXX	XXX	XX	X

## 3.4 Métodos de monitorização

### 3.4.1 Introdução

O projeto de reabilitação estrutural de pavimento requer dois tipos de informação do pavimento em serviço: a rigidez das camadas e a espessura das mesmas. A avaliação da capacidade de carga é feita com base nos resultados obtidos através de ensaios de carga realizados com o Defletómetro de Impacto ao longo do pavimento em estudo (Fontul, 2019). A rigidez das camadas é calculada usando modelos de comportamento estrutural. Para o estabelecimento destes modelos é importante conhecer a estrutura do pavimento, nomeadamente a espessura das camadas e o material constituinte. O GPR realiza uma avaliação contínua da espessura das camadas de pavimento, permitindo obter informação em todos os pontos ensaiados nos ensaios de carga. Assim, uma combinação de ensaios de capacidade de carga e GPR para avaliação da espessura é fundamental para a correta análise e conceção de pavimento de estradas e principalmente para a sua reabilitação (Rasol, et al., 2022).

A avaliação de pavimentos pode ser feita através de: inspeção visual, realização de ensaios não-destrutivos, recolha de carotes e realização de poços, complementados com ensaios em laboratório para caracterização de materiais recolhidos na prospeção (Rasol, et al., 2022).

### 3.4.2 Inspeção visual

Os principais aspetos a observar na inspeção visual de pavimentos flexíveis são fendas isoladas (longitudinais e transversais), fendas de reflexão, fendilhamento (tipo "pele de crocodilo" e em blocos), degradação permanente (cavados de rodeira), desagregação superficiais, ninhos e peladas, assentamentos, ondulação de superfície (irregularidade longitudinal) e exsudação de betume (Fontul, 2021).

Este método, embora seja útil, por si só não é suficiente para ter uma ideia muito clara sobre a real dimensão (profundidade) das fendas e degradações dos pavimentos flexíveis. Para isso, é preciso recorrer a outros ensaios não destrutivos e recolha de amostras, que serão aprofundados de seguida.

### 3.4.3 Ensaio de carga

O Defletómetro de Impacto (FWD) (*Falling Weight Deflectometer* na literatura em Inglês) é um equipamento de ensaios de carga não destrutivo (Figura 3.8). Os resultados obtidos a partir do FWD permitem detetar os defeitos relacionados com a perda de capacidade de carga de pavimentos. O ensaio destina-se a avaliar a capacidade estrutural de um pavimento, medindo a resposta do pavimento a uma carga de impacto. As espessuras das camadas são medidas e comparadas com os resultados obtidos com carotes e com GPR.

Trata-se de um ensaio não destrutivo, normalizado pela ASTM D4694-96 (2003) – “Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device” (Rodrigues Lopes, 2010).

O equipamento está instalado no atrelado e o ensaio consiste na aplicação de uma força de impulso gerada pela queda de uma massa de uma determinada altura sobre um conjunto de amortecedores e na medição das deflexões daí resultantes na superfície do pavimento (Figura 3.9). A força é transmitida ao pavimento através de uma placa circular com 300 ou 450 mm de diâmetro e possui uma variação ao longo do tempo por forma a simular a passagem de um veículo a uma velocidade entre 60 e 80 km/h. Para a medição das deflexões na superfície do pavimento, o atrelado é equipado com uma viga com geofones, onde a cada um corresponde um valor de assentamento da superfície do pavimento; o equipamento também faz medição da temperatura da superfície do pavimento; para uma correta análise dos resultados (Fontul, 2021).



Figura 3.8 - Equipamento FWD (Fontul, 2021)

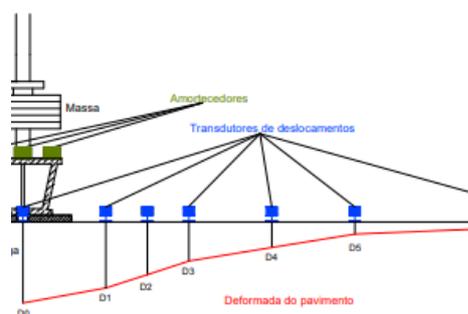


Figura 3.9 - Esquema do FWD (Fontul, 2021)

A temperatura é uma informação muito importante para análise do comportamento de um pavimento, pois a temperatura influencia as deflexões: quanto mais alta a temperatura, maior serão as deformações (Alves, 2007).

A principal vantagem em poder analisar a bacia defletométrica de um pavimento é em permitir uma melhor avaliação estrutural de cada camada, permitindo avaliar o módulo de elasticidade das várias camadas (Barbosa, et al., 2010).

### 3.4.4 Medição de espessuras

Um dos métodos para medição de espessuras é a extração de carotes ver (Figura 3.11), sendo que uma das suas principais finalidades é precisamente o conhecimento da espessura das camadas ver (Figura 3.10). Uma desvantagem deste método é de permitir extrair amostras de camadas ligadas.

Os dados relativos às espessuras das camadas constituintes dos pavimentos são geralmente obtidos ou confirmados através da realização de sondagens por rotação e/ou poços (Fontul, 2021).

Outro método muito eficiente para medição de espessuras de camadas é o GPR, que permite a detecção em contínuo da posição de camadas de pavimento abaixo da sua superfície, à velocidade do tráfego. O GPR emite impulsos de alta frequência, em forma de onda eletromagnética sinusoidal, que se propaga verticalmente através das várias camadas, sendo parte dela refletida em cada delimitação entre camadas. À medida que onda se propaga através de várias camadas, sofre mudanças de velocidade e de intensidade devido a fenômenos de absorção e dissipação, sendo refletida na delimitação entre camadas de materiais com características dielétricas diferentes, ver (Figura 3.12).



Figura 3.10 - Poço (Fontul, 2021)



Figura 3.11 - Medição de espessuras (Fontul, 2021)

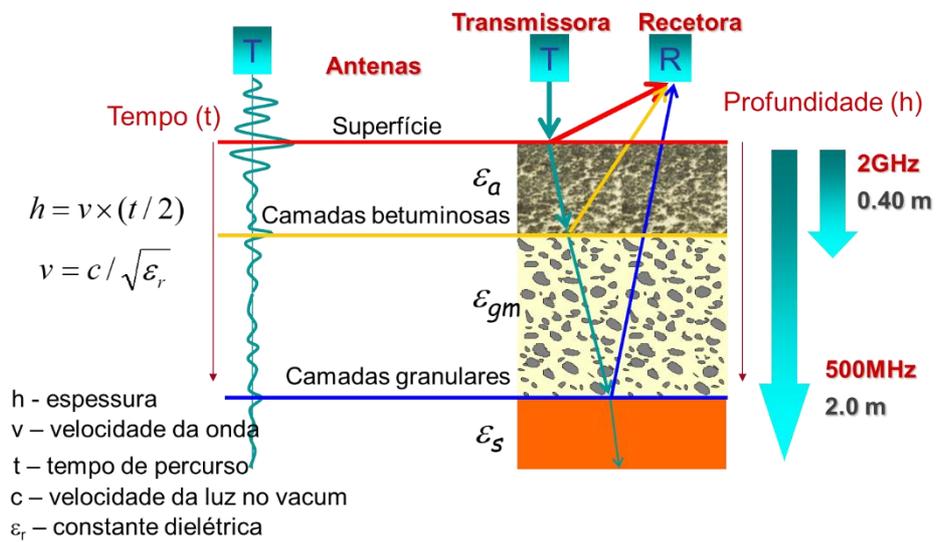


Figura 3.12 - Funcionamento do GPR (Fontul, 2021)

A utilização do GPR requer sempre o conhecimento preliminar da constituição de pavimentos e a realização de sondagens em locais selecionados, para calibrar os resultados. A interpretação dos resultados é trabalhosa e requer técnicos experimentados, nem sempre sendo possível detetar a delimitação entre camadas do mesmo tipo de material (Fontul, 2021).

### **3.5 Considerações finais**

Este capítulo, teve como o objetivo fazer uma breve descrição sobre os pavimentos e em particular, pavimentos flexíveis aeroportuários no que se refere a sua constituição, funcionamento, exigências funcionais e estruturais e métodos para a determinação das espessuras.

Como será referido no próximo capítulo, sobre o GPR, uma das principais valências deste equipamento é a medição das espessuras das camadas que constituem os pavimentos.

## RADAR DE PROSPEÇÃO

### 4.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os princípios de funcionamento do GPR e alguns exemplos da sua aplicação. Assim, apresenta a evolução histórica, aspetos gerais, princípios fundamentais do método, a sua aplicação e essencialmente, a metodologia desenvolvida com base em GPR, com exemplos de aplicação, na avaliação de pavimentos flexíveis aeroportuários.

### 4.2 Conceitos gerais

O sistema GPR consiste em três elementos principais: as antenas (uma transmissora e outra recetora), a unidade de controlo e a unidade de visualização (Davis, et al., 1989), ver Figura 4.1. A antena transmissora gera ondas magnéticas sinusoidais e a recetora recolhe o sinal devolvido ao longo do tempo. Parte da onda transmitida é refletida na interface entre materiais com características dielétricas diferentes e parte do sinal continua a propagar-se através do meio a ensaiar. Como já referido, o sinal sofre fenómenos de absorção e dissipação no meio ensaiado. Quanto maior a diferença entre as propriedades dielétricas dos meios adjacentes maior a amplitude da onda refletida. É registado o tempo de percurso da onda e a amplitude do sinal. O tempo de percurso pode depois ser convertido em distância percorrida, que no caso de pavimentos é a espessura de cada camada, com base na informação recolhida na prospeção, como a espessura das carotes e poços em localizações precisas ao longo do pavimento.

Os sistemas GPR operam numa gama de frequência finita que é normalmente selecionada em função dos objetivos do estudo. No caso dos pavimentos rodoviários e aeroportuários são utilizadas gamas de frequência altas (entre 1 e 2,5 GHz), que permitem ensaios até cerca de 1 m de profundidade com boa resolução, permitindo detetar camadas com espessuras de 3

a 5 cm (Fontul, 2021). Por outro lado, a atenuação aumenta com a frequência, portanto o sinal de alta frequência não se pode propagar tão longe e a profundidade de detecção torna-se mais reduzida. Para frequências mais baixas, geralmente utilizadas em geotecnia, para detecção de cavidades, o GPR pode penetrar mais profundamente, mas a resolução é mais baixa.

As antenas são componentes essenciais dos sistemas de GPR que transmitem e recebem ondas eletromagnéticas. Vários tipos de antenas são utilizados para sistemas GPR, podendo ser divididas em antenas em contacto com a superfície (*ground coupled*) e antenas suspensas (*air coupled*). A maioria dos sistemas utiliza duas antenas: uma para transmitir e a outra para receber, embora possam ser instaladas na mesma caixa. Alguns sistemas GPR comerciais empregam antenas blindadas para evitar reflexos de objetos adjacentes (Fontul, et al., 2022).

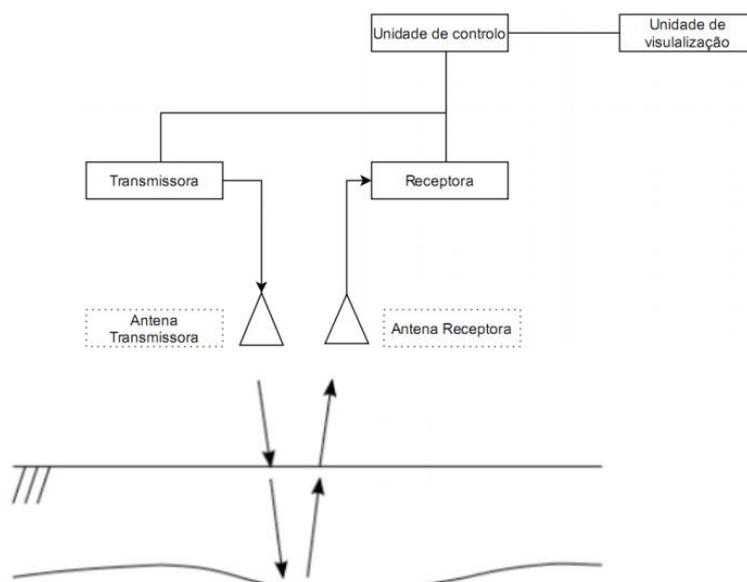


Figura 4.1 - Diagrama de blocos de um sistema GPR, adaptado de (Takahashi, Kazunori, et al., 2012)

O GPR do LNEC (Figura 4.2) atualmente utilizado para a avaliação de pavimentos aeroportuários é constituído por dois pares de antenas, um par com a frequência de 1,6 GHz e outro de 0,9 GHz, uma roda medidora de distância, um equipamento de aquisição de dados e um equipamento de visualização. É de referir que a principal diferença entre os dois pares de antenas reside na resolução e na profundidade a que penetram.



Figura 4.2 - GPR com antenas de 0.9 e 1.6 GHz

A antena de 1600 MHz é uma antena de alta resolução e polivalente utilizada em tabuleiros de pontes para avaliação do seu estado e para inspecionar estruturas de betão, ver Figura 4.3. Esta antena pode ver alvos mais profundos, mantendo ao mesmo tempo uma boa capacidade de resolução do alvo. A antena de 1600 MHz é compatível com as unidades de controlo SIR 4000, SIR 20 e SIR 30 (Allied, 2019). É uma antena concebida para aplicações que requerem uma penetração pouco profunda, até 0,5 m (0-18 in).

A Smart Antena - Modelo 51600S é uma antena "inteligente" de 1600 MHz. Esta antena tem um chip especial que funciona com o SIR-30 e futuras unidades de controlo. Este chip identifica a antena à unidade de controlo do sistema SIR para que o controlador seja capaz de carregar automaticamente as definições corretas, por defeito. O 51600S funciona com um SIR-3000, SIR-20 ou qualquer um dos controladores anteriores da GSSI, mas o utilizador tem de definir manualmente os parâmetros de recolha no SIR-sistema (Allied, 2019).



Figura 4.3 - Antena de 1600 MHz (GSSI, 2022)

A antena de 900 MHz é uma antena blindada concebida para aplicações que requerem uma penetração até 1 m, incluindo deteção de vazios, avaliação da espessura do betão e localização de condutas pouco profundas, ver Figura 4.4. Pode também ser utilizada para localização de vergalhões onde o espaço não é limitado. Esta antena é compatível com as unidades de controlo SIR 4000, SIR 20 e SIR 30 (GSSI, 2022).



Figura 4.4 - Antena de 900 MHz (GSSI, 2022)

### 4.2.1 Evolução histórica

O GPR no solo é um método geofísico que emprega a técnica eletromagnética, transmitindo e recebendo ondas para avaliação da subsuperfície. Uma das suas primeiras aplicações bem sucedidas foi a medição da espessura do gelo em placas de gelo polar na década de 1960 (Knödel, et al., 2007). Desde então, tem havido desenvolvimentos no hardware, técnicas de medição e processamento e análise dos resultados. O GPR tem sido amplamente utilizado em muitas aplicações, tais como arqueologia, engenharia civil, forense, geologia e deteção de condutas (Daniels, 2004).

Este método tem as vantagens de ser expedito e não destrutivo, sendo considerado um dos métodos mais adequados para a medição das espessuras das camadas de pavimentos e deteção de mudanças de estrutura e de defeitos. A aquisição de dados com GPR é expedita em comparação com outros métodos geofísicos, o que faz com que as medições sejam feitas rápida e repetidamente. O GPR pode ser utilizado como um método completamente não invasivo (Takahashi, Kazunori, et al., 2012). No entanto o processamento de dados é mais moroso e requer técnicos experientes para a sua realização com confiança.

Os sistemas GPR são compactos e fáceis de utilizar em comparação com outros métodos geofísicos permitindo a digitalização sobre uma vasta área e a recolha de dados 2D ou 3D. Além disso, a distribuição das propriedades do solo pode ser obtida com alta resolução espacial (Takahashi, Kazunori, et al., 2012).

O LNEC foi, em 1998, pioneiro na utilização de antenas de GPR de alta frequência, suspensas, especialmente desenvolvidas para avaliação de pavimentos (Fontul, et al., 2022).

## 4.2.2 Princípios fundamentais do método

As ondas eletromagnéticas são o resultado da propagação de radiação, num meio físico ou no vácuo, que resultam da atuação de fontes de energia elétrica e magnética em simultâneo. A sua classificação depende da frequência, tendo no início do espectro ondas rádio, com baixa frequência e grande comprimento de onda, e, na outra ponta do espectro, raios gamma, com elevada frequência e baixo comprimento de onda.

A relação da frequência com o comprimento de onda é descrita pela Equação 4.1 sendo estas grandezas inversamente proporcionais: a frequência, em Hertz ( $f$ ), é igual à velocidade de propagação da luz no vácuo ( $C$ ) sobre o comprimento de onda ( $\lambda$ ), em metros.

$$f = \frac{C}{\lambda} \quad 4.1$$

Para estimar a espessura ( $h$ ) de uma camada, de pavimento através do uso do GPR, é necessário conhecer a velocidade ( $v$ ) de propagação da onda no meio e o tempo ( $t$ ) de propagação da onda através desta camada como se pode observar na Equação 4.2.

$$h = \frac{vt}{2} \quad 4.2$$

O tempo é medido diretamente pelo GPR, sendo a velocidade dependente da permissividade relativa ou constante dielétrica do meio por onde a onda se propaga ( $k$ ) e da permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ), calculada através da Equação 4.3.

$$v = \frac{K}{\sqrt{\epsilon}} \quad 4.3$$

A constante dielétrica ( $K$ ) é uma característica do material e mede a permitividade dielétrica relativa em comparação com o vácuo, sendo por isso uma grandeza adimensional.

O seu valor pode ser afetado de modo considerável por fatores externos, nomeadamente a presença de ar e de água, que apresentam constantes dielétricas muito diferentes, 1 e 81 respetivamente, ver Tabela 4.1 (Lopes, 2017).

Tabela 4.1 - Constante dielétrica de diferentes materiais (Ulriksen, 1982) citado por (Lopes, 2013)

Material	Constante dielétrica - K	Velocidade (mm/ns)
Ar	1	300
Água de nascente	81	33
Água do mar	81	33
Neve Polar	1,4 – 3	194 – 252
Gelo Polar	3 – 3,15	168
Gelo Temperado (Temperate ice)	3,2	167
Gelo Puro	3,2	167
Lago gelado	4	150
Mar gelado (Sea ice)	2,5 – 8	78 – 157
"Permafrosi" (solo abaixo dos 0°)	1 – 8	106 – 300
Areia seca da costa	10	95
Areia (seca)	3 – 6	120 – 170
Areia (molhada)	25 – 30	55 – 60
Sedimentos (molhados)	10	95
Argila (molhada)	8 – 15	86 – 110
Solo argiloso seco	3	173
Pântano	12	86
Terra Agrícola	15	77
Terra Pastoral	13	83
Solo ameno	16	75
Granito	5 – 8	106 – 120
Pedra Calcária	7 - 9	106 – 113
Dolomite	6,8 – 8	106 – 115
Basalto (molhado)	8	106
Xisto (molhado)	7	113
Arenito (molhado)	6	112
Carvão	4 – 5	134 – 150
Quartzo	4,3	145
Cimento	6 – 30	55 – 112
Asfalto	3 – 5	134 – 173
PVC, Poliésteres, Epoxy	3	173

No caso das misturas betuminosas, como a sua composição é muito variável, a definição de um valor único para a constante dielétrica é bastante difícil. Para além deste facto, é ainda necessário considerar a influência de fatores externos, como o índice de vazios e a idade da mistura. No processo de realização de ensaios com GPR, para determinar um valor de constante dielétrica, é necessário conhecer a espessura da camada betuminosa num dado local da realização do ensaio, por forma a calibrar a velocidade da onda na mistura betuminosa e, conseqüentemente a sua constante dielétrica. Assim, são necessários ensaios semidestruídos ou

destrutivos, como a extração de carotes. Com estes dados (carotes) é possível conhecer a espessura do pavimento naqueles locais e, como foi referido, o GPR fornece informação sobre o tempo de propagação da onda refletida nos mesmos pontos. Com estes dados e aplicando as equações (4.2) e (4.3) é determinado o valor da constante dielétrica, que é assumido como constante ao longo de uma secção do pavimento. No entanto, este valor apenas traduz a realidade local do pavimento e consequentemente poderá induzir erros na análise dos dados (Lopes, 2017).

### **4.3 Campos de aplicação**

Os ensaios não destrutivos de alto rendimento são cada vez mais utilizados na avaliação de infraestruturas de transporte. Equipamentos como o GPR permitem a realização de ensaios ao longo de pavimentos ou vias-férreas, de forma contínua e à velocidade de tráfego (80 a 120 km/h), obtendo informação sobre a condição da infraestrutura. O volume de dados adquirido é significativo, permitindo uma identificação quase contínua da constituição da infraestrutura, da espessura das várias camadas e a localização, com precisão, de eventuais mudanças de estrutura (Fontul, et al., 2022). A informação assim obtida, em conjunto com os resultados dos ensaios de carga, permite a avaliação estrutural do pavimento (Fontul, et al., 2022).

A aplicação do GPR permite identificar nos pavimentos a presença de fendas, camadas desligadas, presença de água e vazios. Nesta dissertação, será dada particular atenção à medição de espessura de camadas de pavimentos flexíveis aeroportuários e possibilidade de, em conjunto com os resultados dos ensaios de carotes e FWD respetivamente ser usado para avaliação estrutural de pavimentos. Estes resultados serão integrados na metodologia BIM, que permite ter uma visão noutras dimensões para além do 2D, como já foi referido no Capítulo 2.

## **4.4 Avaliação de pavimentos**

### **4.4.1 Metodologia de ensaio**

A metodologia do ensaio pode ser descrita de forma simplificada através de fluxograma apresentado na Figura 4.5.

Devido à grande quantidade de dados envolvidos no processo, é necessária uma ferramenta eficiente para a retroanálise dos módulos de camadas usando os dados do defletómetro de impacto combinados com as espessuras obtidas com o GPR (Fontul, et al., 2022).

O método proposto neste estudo visa otimizar a aplicação do defletómetro de impacto e do GPR (Marecos, et al., 2017). O principal objetivo é realizar a interpretação de todos os resultados dos ensaios com defletómetro de impacto, ver Figura 4.6, e consequentemente, avaliar a estrutura do pavimento em todos os pontos de ensaio. Para este efeito, os resultados do GPR são processados de modo a obter um valor médio da espessura de cada camada num intervalo de 5 m, ver Figura 4.7; em torno de cada ponto de ensaio com o defletómetro de impacto (Fontul, et al., 2022).

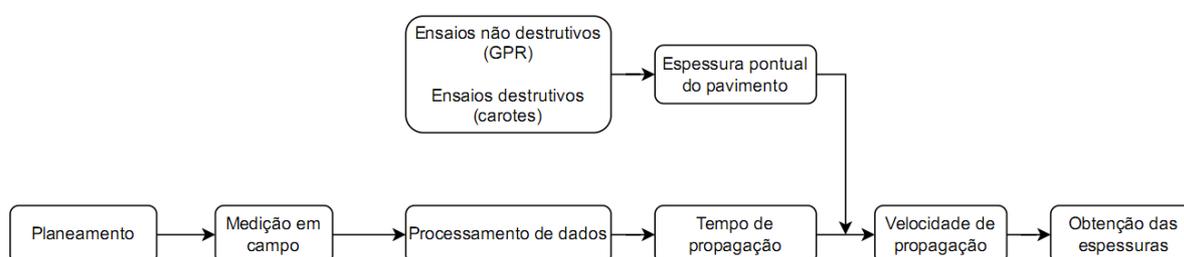


Figura 4.5 - Fluxograma da metodologia de ensaio e processamento de GPR, adaptado de (Lopes, 2017)

### 4.4.2 Processamento de dados

Os dados recolhidos no campo a partir dos ensaios de carga com FWD (Figura 4.6) e da medição de espessuras com o GPR, (Figura 4.7), podem ser visualizados e processados recorrendo a metodologia BIM, como já foi referido no Capítulo 2.

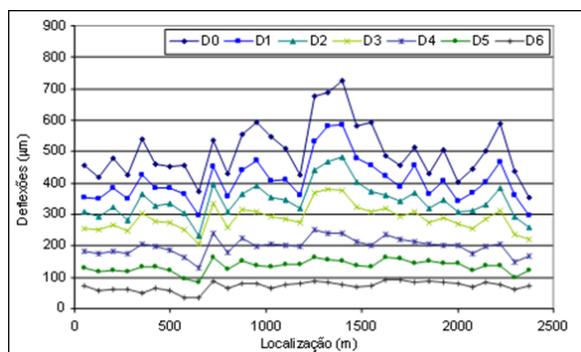


Figura 4.6 - Deflexões medidas no campo com o defletómetro de impacto (Fontul, et al., 2022)

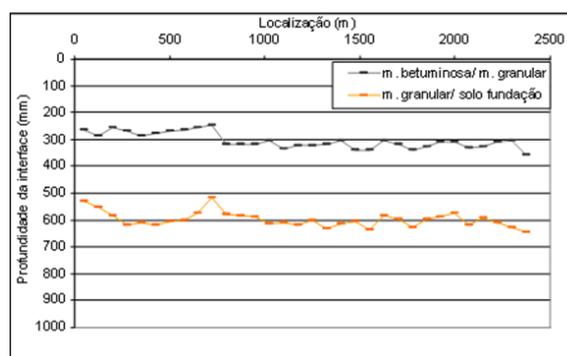


Figura 4.7 - Interface entre as camadas do pavimento obtida com o GPR (Fontul, et al., 2022)

As deflexões foram medidas, tendo valores compreendidos entre 100 e 750  $\mu\text{m}$ , localizadas a cada 75 m.

As diferentes camadas de pavimentos flexíveis e as suas profundidades são detetadas recorrendo ao GPR.

A obtenção de espessuras com dois métodos de ensaios diferentes permite fazer uma comparação entre elas e com as espessuras tidas aquando do projeto com o objetivo de verificar se houve alteração das espessuras. Caso haja alguma alteração, será vista como um defeito, como será aprofundado no caso de estudo, Capítulo 5.

## 4.5 Ensaio realizado em trecho experimental

Foi realizado um ensaio no LNEC sobre um pavimento flexível composto por quatro camadas diferentes, uma de mistura betuminosa, outra granular e as outras duas de solo, destinada para Estradas de Baixo Volume de Tráfego, doravante denominada por EBVT, ver Figura 4.8. Foram medidas as espessuras das camadas (Figura 4.9), podendo posteriormente ser monitorizadas e controladas as suas características num modelo físico construído no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), inserido no projeto TROPICAL-PAV. Para medir e avaliar estas características da EBVT, foram utilizados equipamentos descritos ao longo do presente capítulo.



Figura 4.8 - Entrada do pavilhão de LNEC



Figura 4.9 - Pavimento flexível EBVT

Em qualquer tipo de aquisição geofísica é necessário que se faça um planeamento antes dos ensaios de campo, incluindo com o GPR. Antes de proceder ao levantamento é preciso ter informação sobre o local onde o estudo será realizado e sobre o objetivo do estudo para se obter bons resultados. É importante ter uma ideia sobre a geometria do pavimento, o tipo de material, e eventuais reparações para se escolher a frequência mais adequada para as antenas e os alinhamentos dos ensaios a realizar.

Informação sobre a área onde o ensaio será realizado, como a topografia, a presença de matas fechadas, lagos e rios, também são interessantes pois ajudam a escolher a técnica de aquisição mais eficiente para o tipo de estudo desejado. Existem quatro modos de operar um sistema de radar: o perfil de reflexão com afastamento constante ou *common offset* (CO); o perfil de ponto médio comum ou *common midpoint* (CMP), o perfil de reflexão e refração de grande abertura angular ou *Wide Aperture Reflection or Refraction* (WARR) e a transiluminação ou tomografia de radar. Neste estudo foi utilizado o perfil de reflexão.

Após o planeamento e a escolha da técnica de aquisição, o próximo passo é definir os parâmetros de aquisição dos dados que melhor contribuirão para se obter resultados satisfatórios. Nomeadamente, devem ser estipuladas a frequência das antenas ( $f$ ), a orientação das antenas, a frequência de amostragem ( $f_a$ ), o intervalo de amostragem espacial ( $\Delta x$ ) e a orientação do perfil.

## 4.6 Considerações finais

O presente capítulo permitiu descrever de forma sucinta a metodologia de funcionamento por GPR e o campo da sua aplicação. Por outro lado, permitiu demonstrar alguns princípios do GPR, o seu historial, a importância da realização de ensaios não destrutivos e de uma análise e interpretação de dados eficiente e rigorosa. No próximo capítulo, será apresentado um caso de estudo com integração dos dados de pavimentos recolhidos com GPR num modelo BIM.

## CASO DE ESTUDO

### 5.1 Considerações iniciais

O objetivo deste capítulo é a aplicação dos conhecimentos apresentados num caso de estudo selecionado para o efeito. Assim, é feita uma descrição geral do caso de estudo com a informação de dados relevantes sobre o pavimento aeroportuário, a compreensão da infraestrutura do pavimento e do seu funcionamento em termos de segurança e utilização com base nos defeitos detetados no Caminho de Circulação (CC) a nível estrutural e funcional e, ainda, no que se refere à interpretação de resultados de ensaios com o GPR, a comparação dos resultados obtidos em diferentes pontos de pavimento. Depois são apresentados diferentes aspetos da modelação BIM, como o *software* usado, os passos de desenvolvimento do modelo e a forma de visualização dos desvios das espessuras das camadas dos pavimentos. A elaboração deste caso prático de estudo, permite que a dissertação fique mais completa.

### 5.2 Descrição do caso de estudo

O caso de estudo selecionado compreende a análise de uma via de circulação de um aeroporto em Portugal. Atendendo a complexidade de todas as infraestruturas que compõem um aeroporto, os testes desenvolvidos estão centrados num grupo particular de infraestruturas consideradas críticas para o seu funcionamento, referindo-se à avaliação da qualidade, segurança, e vulnerabilidade dos pavimentos das áreas operacionais.

Para efeitos do caso de estudo, apenas o caminho de circulação com 25 m de largura, bermas de 13 m e mais de 750 m de comprimento, foi considerado para a análise das campanhas de avaliação de pavimentos. Foram realizados ensaios com o GPR, utilizando 2 antenas suspensas de 1,0 GHz de frequência para aplicações que requerem uma penetração até um 1m e de 1,8 GHz de frequência para aplicações que requerem uma penetração até um 0,5m, com um intervalo de amostragem de 0,25 m. Assim, os resultados obtidos forneceram um levantamento praticamente contínuo da interface entre camadas ao longo de cada alinhamento ensaiado. Os ensaios com o GPR foram efetuados em contínuo nos mesmos alinhamentos dos ensaios de carga com HFWD. A referenciação dos resultados foi efetuada através de coordenadas GPS.

A calibração das medições realizadas com o GPR foi realizada com base nas sondagens à rotação e poços executados na campanha de prospeção.

O Caminho de Circulação (Taxiway) [TWY] é a via definida num aeródromo terrestre preparada para a circulação das aeronaves no solo e destinada a assegurar a ligação entre duas partes desse aeródromo (ANAC, 2018).

Neste sentido, foram analisados os dados de monitorização das características funcionais e estruturais dos pavimentos aeroportuários por inspeção visual, extração de carotes e aberturas de poços, a fim de detetar os defeitos. No que se refere à avaliação de infraestrutura rodoviária procura-se, com recurso a metodologia BIM, identificar a informação referente às contribuições de ensaios não destrutivos com GPR efetuados sobre a infraestrutura aeroportuária denominada de CC para o controlo de qualidade durante a construção e realização de ensaios de cargas durante a sua vida de serviço. Os ensaios não destrutivos com GPR permitem a obtenção de informação para incorporar em modelos de comportamento estrutural.

### 5.3 Software BIM

*Autodesk Revit* é um *software* BIM desenvolvido para arquitetos e engenheiros, criado e desenvolvido especificamente para ajudar no design profissional de edifícios e na otimização da sua qualidade, com maior eficiência energética, permitindo aos utilizadores projetar um edifício e os seus componentes em 3D, anotar o modelo com elementos em duas dimensões e elaborar informação a partir da base de dados de modelos de construção. *Revit* é um *software* capaz de usar o 4D BIM e permite, assim, usar ferramentas para planear e acompanhar as várias fases do ciclo de vida de um edifício, desde a conceção à construção e, mais tarde, a demolição. Entre as várias funcionalidades e possibilidades que o *Autodesk Revit* proporciona às entidades que o utilizam, as que mais se destacam são:

- Ferramentas de projeto de arquitetura que auxiliam a recolha e análise de conceitos, mantendo a consistência através da conceção, construção e documentação;
- Ferramentas específicas para engenheiros de estruturas que ajudam, com mais precisão, a projetar e construir estruturas de edifícios de forma eficiente;
- Ferramentas de modelação que ajudam os profissionais de construção na previsão e comunicação da viabilidade do projeto (Maia, et al., 2012).

As características do *Revit Structure* incluem um modelo único para análise estrutural, documentação, de construção e pormenorização das estruturas. As principais características estruturais do *Revit* são as seguintes:

- *Software* de engenharia estrutural para BIM;

- Suporte para vários formatos de dados;
- Ambiente de modelação 3D;
- Componentes paramétricos estruturais;
- Pormenorização estrutural;
- Modelação multimaterial para desenho estrutural;
- Vistas múltiplas de conceção.

O *software* adotado nesta dissertação para modelação é o *Revit Structure* (Versão 2021), desenvolvido pela *Autodesk*. O *Revit Structure* integra um modelo geométrico e analítico multimaterial para permitir uma modelação estrutural adequada à conceção correta de um projeto estrutural.

A plataforma *Revit* fornece ferramentas e funcionalidades adequadas a diferentes especialidades num único modelo BIM, que permite que vários projetos de especialidade criados nos respetivos modelos sejam totalmente compatíveis entre eles, permitindo um trabalho colaborativo sem qualquer tipo de conversão. Atualmente, existem três modelos *Revit* disponíveis no mercado: *Revit Architecture*, *Revit Structure* e *Revit MEP*.

Os modelos acima estão orientados para projetos de arquitetura, estruturas, e mecânicos, elétricos e canalização, respetivamente. A interface do *software* em cada especialidade é idêntica, com exceção de algumas ferramentas e funcionalidades, a fim de permitir uma modelação correta dos vários elementos de várias especialidades. Cada especialidade corresponde a um módulo diferente do mesmo modelo BIM (Lopes, 2017).

## 5.4 Dados de monitorização

Os dados de monitorização utilizados na demonstração do caso de estudo foram recolhidos por técnicos do LNEC em 2020. Com um único ensaio obtiveram-se os registos, nomeadamente as espessuras das duas camadas (betuminosas e granulares) de pavimento flexível de um dos CC do aeroporto, utilizando um GPR com uma antena de 1GHz que pode penetrar até 1m de profundidade, obedecendo ao seguinte critério de alinhamentos: centrado, a quatro (4) e a dez (10) metros à esquerda e à direita transversalmente em relação ao eixo central, ver Figura 5.1.

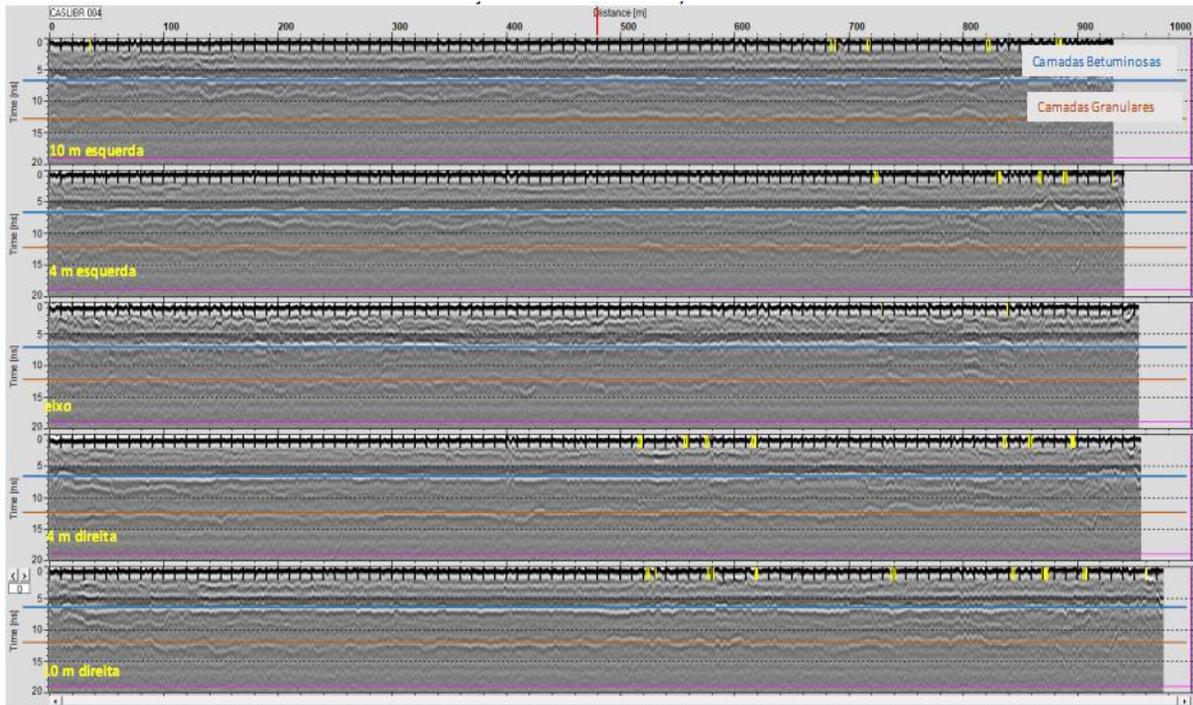


Figura 5.1 - Medição com GPR de 1 GHz

Estes critérios foram definidos com o objetivo de, por um lado, se obter o máximo de informação possível sobre o PA nas zonas críticas, isto é, zonas de impacto dos pneus das aeronaves, que se situam normalmente a menos de 4,5 m do eixo da via, ver Tabela 5.1. Por outro lado, a que atender às zonas das bermas, que distam a 12,5m do eixo da via e onde as camadas têm outras características, para as quais é importante a sua monitorização, ver Tabela 5.2.

Estas espessuras foram obtidas a partir do GPR e ao longo dos 750 m de comprimento do caminho de circulação, apesar de no âmbito da presente análise do caso de estudo apenas se terem analisado dados correspondentes a 400m. Para a aplicação deste caso de estudo, calculou-se uma média das espessuras das camadas betuminosas e granular medidas pelo GPR e o seu desvio padrão a cada 4 metros na longitudinal uma vez que estes valores diferem ao longo do comprimento.

Estes registos permitem visualizar o PA em 3D e as suas respetivas camadas no *software* Revit.

Tabela 5.1 - Afastamento entre a roda externa do trem de aterragem e a borda do caminho de circulação, adaptado de (OACI, ANEXO 14 - Volume I, 2016)

Letra do Código	Afastamento
A	1,5m
B	2,25m
C	3m, se a pista de táxi é destinada a aeronaves com base de rodas inferior a 18m, ou 4,5 m, se a pista de táxi é destinada a aeronaves com base de rodas igual ou superior a 18m.
D	4,5m
E	4,5m
F	4,5m

Tabela 5.2 - Largura das partes retilíneas do caminho de circulação, adaptado de (OACI, ANEXO 14 - Volume I, 2016)

Letra do Código	Largura de caminho de circulação
A	7,5m
B	10,5m
C	15 m, se a pista de táxi for destinada a aeronaves com distância entre eixos menor que 18 m; 18 m, se a pista de táxi for destinada a aeronaves com distância entre eixos maior que 18 m.
D	18 m, se a pista de táxi for destinada a aeronaves com largura do trem de pouso principal menor que 9 m; 23 m, se a pista de táxi for destinada a aeronaves com largura do freio de pouso principal igual ou maior que 9 m.
E	23 m
F	25 m

## 5.5 Desenvolvimento do modelo BIM

### 5.5.1 Criação do modelo do projeto

Antes de iniciar a modelação do caso de estudo é necessário instalar e iniciar o *software* e consequentemente introduzir as respetivas definições apresentadas de seguida.

No contexto da modelação estrutural, o fluxo de trabalho começa com a importação de um modelo arquitetónico como modelo de referência, seguido da sua adaptação a um modelo estrutural e, por último, documentação e dados baseados no modelo.

Primeiramente, criou-se um projeto no "models", e no "template file" escolheu-se "Metric-Architectural Template", ver Figura 5.2. O ambiente de trabalho tem o seguinte aspeto, ver Figura 5.3.

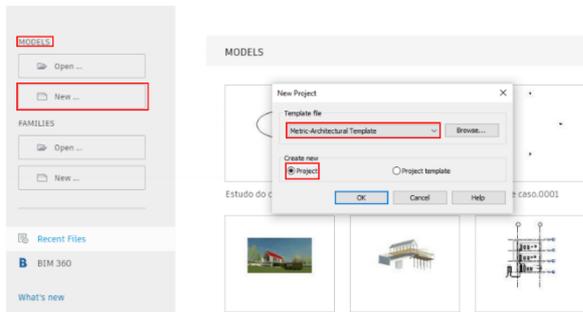


Figura 5.3 - Criação de novo projeto



Figura 5.2 - Aspeto do ambiente de trabalho

Podem observar-se os 4 símbolos correspondentes às 4 elevações (alçados); o centro definido pelas 4 elevações corresponde ao centro da folha.

O passo seguinte é passar as unidades de milímetro (mm) para metro (m) e definir três casas decimais no "Project Units", ver Figura 5.4.

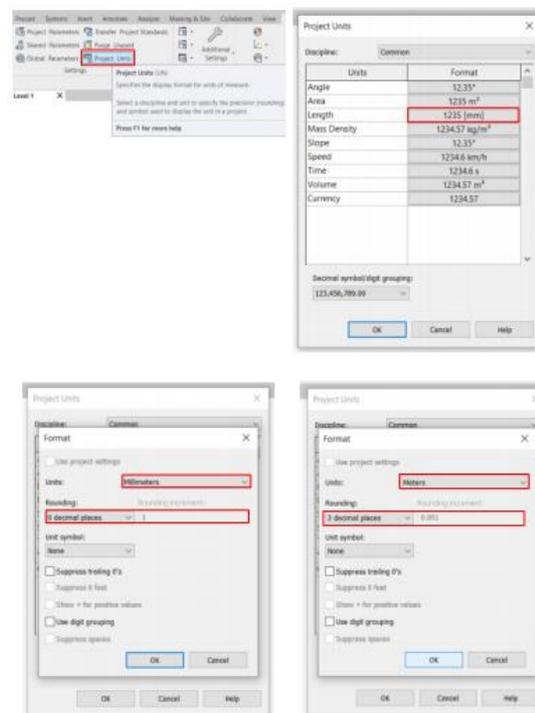


Figura 5.4 - Alterar as unidades e o número de casas decimais

Em seguida, fez-se "Save As", clica-se em "Options" e reduz-se o número de "backups" para 3 backups, ver Figura 5.5.

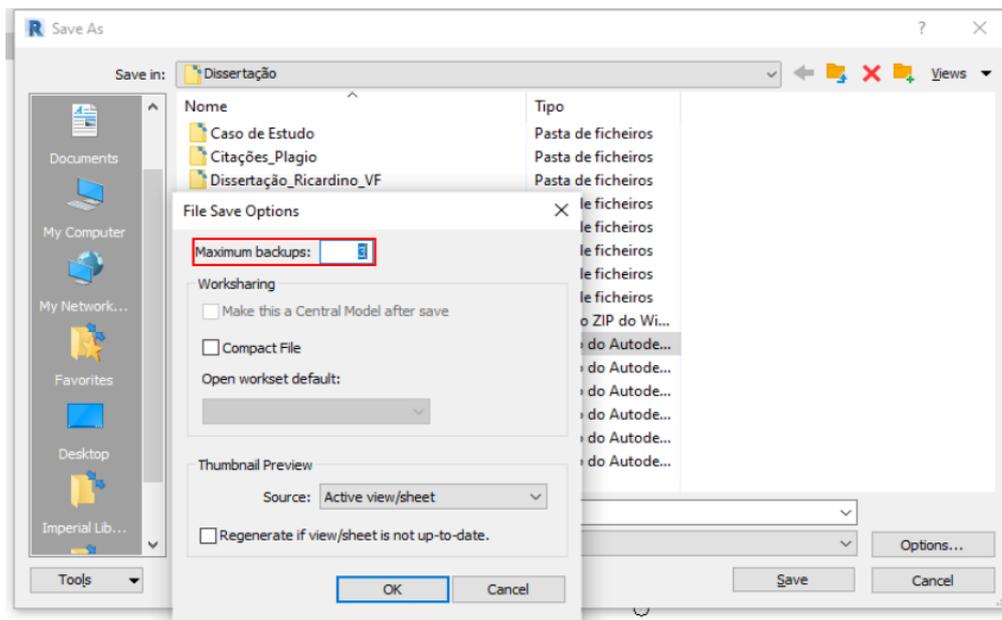


Figura 5.5 - Guardar e alterar o número de cópias de segurança

## 5.5.2 Modelação do pavimento aeroportuário

A modelação do CC é iniciada com a importação do ficheiro em CAD da respetiva planta para o *software* BIM, fazendo "Insert - Import CAD"; escolhe-se o ficheiro guardado anteriormente e muda-se "Import Units" para metros, "Positioning" para "Auto - Center to Center" e verifica-se se "Place at" está no "Level 1", ver Figura 5.6.

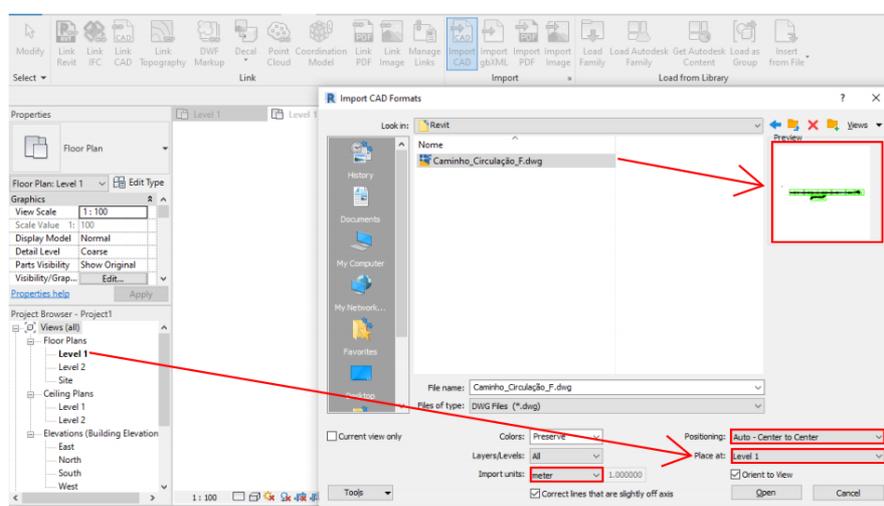


Figura 5.6 - Modelação do caminho de circulação

A inserção das camadas do pavimento aeroportuário corresponde ao pavimento térreo de um edifício e à inserção de pisos no Revit. Para a modelação BIM, decidiu-se dividir o pavimento transversalmente de 4m em 4m na zona central, isto é, uma faixa de 4m centrada no eixo e mais duas faixas de 4m para cada lado dessa, até 6m para cada lado do eixo central. Os centros destas três faixas transversais correspondem à localização dos alinhamentos medidos com o GPR. Foram consideradas ainda duas faixas laterais, de 6,5m para cada lado destas faixas centrais, ou seja, mais 6,5m a partir dos 6m das faixas centrais. Estas faixas laterais compreendem os alinhamentos medidos com GPR a 10m do eixo. Longitudinalmente, decidiu-se dividir o pavimento de 4 em 4 metros ao longo de 400 metros a partir do início do CC, para uma visualização mais rigorosa em termos de informação.

Estas divisões prendem-se com o facto de se pretender, visualizar a informação de forma rigorosa, nomeadamente as condições estruturais e funcionais dos pavimentos, porque se trata de zonas críticas, com registos recolhidos por GPR.

Para criação no Revit, optou-se pelo objeto da arquitetura em detrimento do objeto da estrutura, na medida em que na arquitetura é possível a utilização de algumas ferramentas que a estrutura não tem, como por exemplo: acabamento por cima do piso, como pintura, etc. Por outro lado, perdem-se as propriedades resistentes que o objeto estrutura pode oferecer, mas globalmente a opção tomada é melhor para visualização dos dados.

Na janela do diálogo, "properties" e "Edit Type", ver (Figura 5.7), e aberta a janela que permite especificar as alturas do topo da superfície das camadas a partir de cota zero, "level 1". Nas propriedades, já vem previamente definida uma espessura e um nome genérico.

O comando do piso "floor" está na aba "Architecture", em seguida, clica-se em "Floor: Architectural" como mostra a (Figura 5.8), e abre-se a janela "properties".

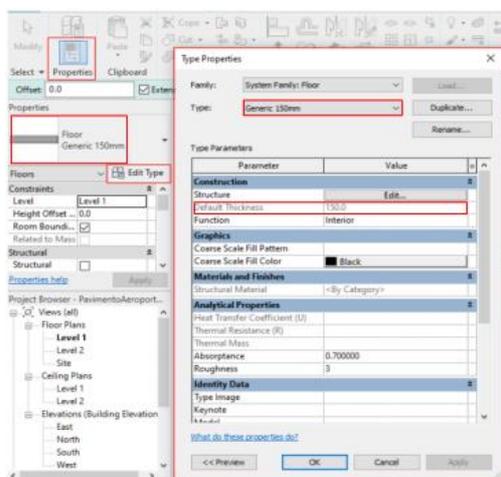


Figura 5.7 - Propriedades

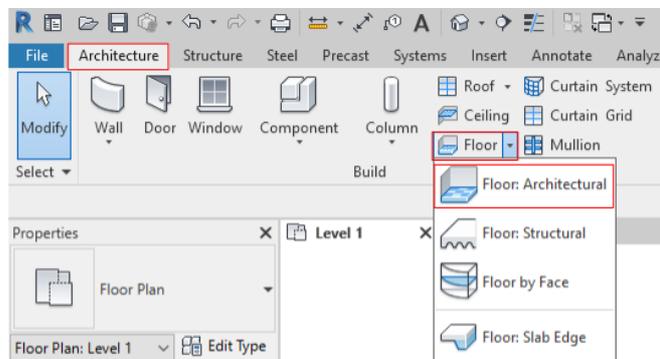


Figura 5.8 - Janela arquitetura - Piso: Arquitetura

A inserção das camadas é feita a partir de cota zero, "level 1". Uma vez que o Revit assume que a camada do piso térreo está abaixo da cota zero, deixa de ser necessário introduzir valores negativos, ver Figura 5.9.

Antes de fazer "edit" para definir as alturas das camadas, deve-se dar nomes às respectivas camadas no "rename", pois estas vêm previamente definidas com uma espessura e um nome genérico como foi visto acima. Como uma mesma camada foi dividida transversalmente em cinco partes, foi preciso duplicar as camadas clicando no "duplicate", e dar outro nome, ver Figura 5.10.

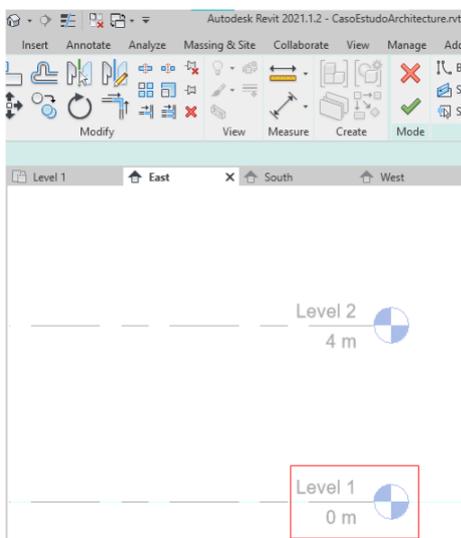


Figura 5.9 - Camada, nível 1

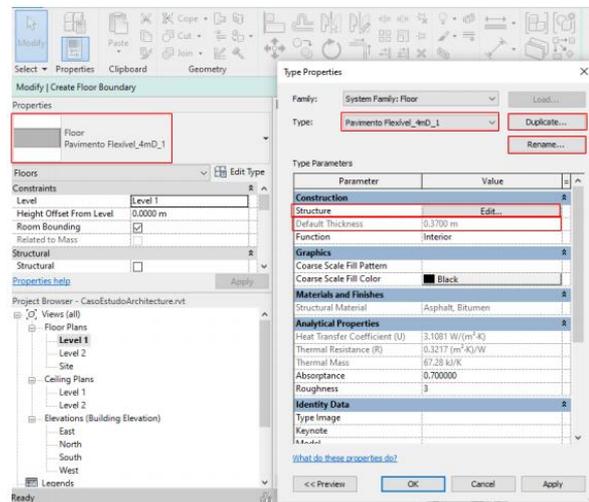


Figura 5.10 - Editar propriedades

Para definir os contornos das camadas no desenho, clica-se em linha de fronteira, "Boundary line", ou em linha, "line", para definir os contornos desejados e termina-se o modo de edição, "Finish Edit mode", para finalizar, ver Figura 5.11.

No menu editar das propriedades, são definidos: o limite principal ou superior, "Core Bound", a camada acima ou primeira camada a contar do topo, "Layer Above", e a espessura, "Thickness", ver Figura 5.12.

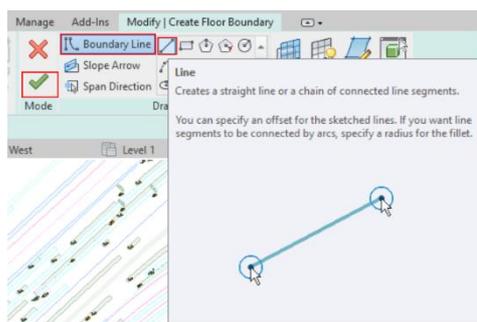


Figura 5.11 - Edição de contornos

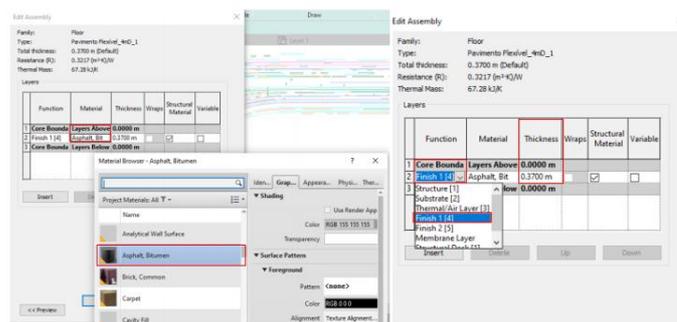


Figura 5.12 - Edição das camadas

O processo para a construção da segunda camada (granular), é semelhante aos passos dados para a construção da primeira camada betuminosa. Mas, como o *software* está mais vocacionado para modelação de edifícios, é normal que não tenha todos os materiais utilizados em infraestruturas. Sendo assim, foi necessário criar um material novo com características muito próximas do material desejado, ver Apêndice A.1. Os passos para a sua criação encontram-se no Apêndice A.2.

### 5.5.3 Visualização dos dados de monitorização

Os dados da monitorização do CC com o GPR correspondem ao registo das espessuras das camadas do pavimento aeroportuário. A visualização do estado de conservação do PA é obtida através da representação em modelo dos desvios na espessura das camadas em relação às de projeto. Estes possíveis desvios correspondem às diferenças existentes nas espessuras das camadas.

A representação das diferenças de espessura das camadas é feita com base na atribuição de cores, tendo por um lado, a finalidade de tornar mais claro, simples e objetivo a diferença de espessuras médias existentes nas parcelas das camadas em relação às espessuras reais do projeto. Ou seja, sempre que for verificada uma diferença, tanto para mais como para menos, ou até mesmo quando não se verificar nenhuma diferença, é atribuída uma cor consoante o caso e a dimensão. Por outro lado, as cores são utilizadas igualmente para o caso da observação das diferenças em relação ao desvio padrão das espessuras, em cada quatro metros, ao longo dos quatrocentos metros do caminho de circulação.

Para a concretização destes objetivos no modelo 3D BIM no Revit, é preciso seguir os passos, apresentados de seguida, através do separador arquitetura "architecture", mas só depois de já se ter desenhado as camadas do pavimento, "floors", ver Figura 5.13.

- 1- Pavimento, "Floor";
- 2- Grelha, "Grid";
- 3- Separador, "Room Separator";
- 4- Sala, "Room";
- 5- Parâmetros de Projetos, "Projects Parameters";
- 6- Esquemas/Quantidades, "Schedules/Quantities";
- 7- Legenda de Cores, "Color Legend".

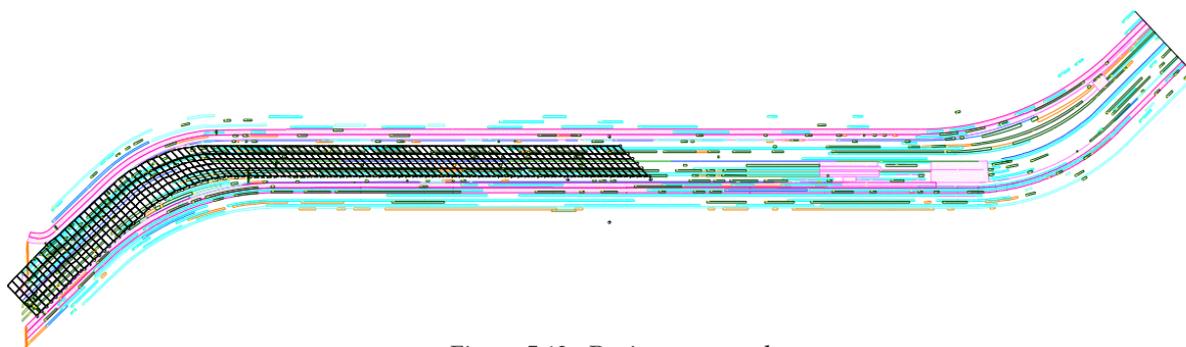


Figura 5.13 - Pavimento em planta

Tendo em conta a forma como foram recolhidos os dados do pavimento com GPR, como mostra a Figura 5.1, tiveram de se criar grelhas, sendo preciso criar separadores para poder identificar com cores distintas as zonas da berma do lado direito e esquerdo e da zona central.

Para o traçado das grelhas longitudinais, foi preciso seleccionar a opção Grelha Multi-Segmento "Multi-Segment Grid", uma vez que os segmentos não são retilíneos, ver Figura 5.14.

Neste sentido, depois de se modelar o pavimento com as respectivas camadas, o traçado das grelhas transversais foi feito como se observa na (Figura 5.15) e a compartimentação foi feita através do "Room Separator", ver Figura 5.16.

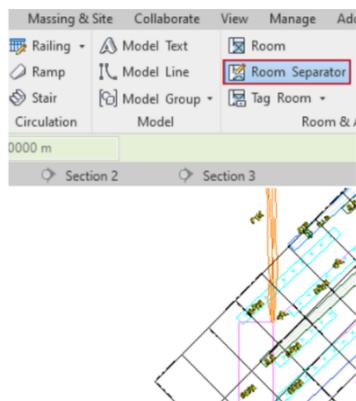


Figura 5.14 - Separador

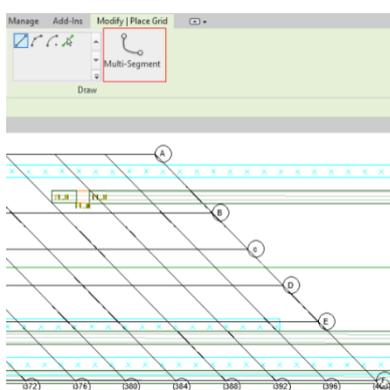


Figura 5.15 - Grelhas longitudinais

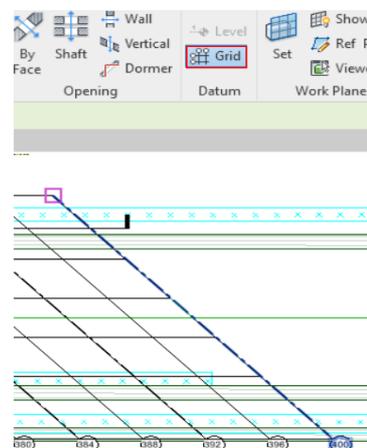


Figura 5.16 - Grelhas transversais

Para que posteriormente se possam conseguir visualizar diferentes cores que permitam distinguir os parâmetros (espessuras) observados e ainda, para que sejam criados esquemas de cores dos compartimentos de acordo com os seus parâmetros, foi preciso criar separadores ou ambientes conjugados através do *Room* e mudar o nome dos compartimentos, ver Figura 5.17.

No presente caso de estudo, decidiu-se criar os parâmetros de projeto - contentores de informação que definem e depois acrescentam as múltiplas categorias dos elementos de um projeto. Os parâmetros de comunicação extraem um valor de uma condição geométrica e utilizam-no para comunicar os dados a uma fórmula ou como um parâmetro programável. Estes parâmetros foram definidos pela seguinte ordem: **rooms**, **espessura1**, **desvio padrão1**, **espessura2**, **desvio padrão2** e **espessura total**. Os passos dados para os criar os "Projects parameters" podem-se observar na (Figura 5.18).

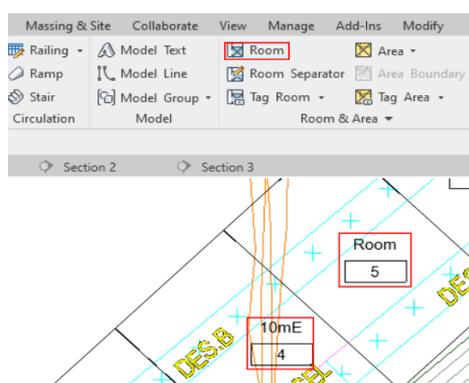


Figura 5.18 - Rooms

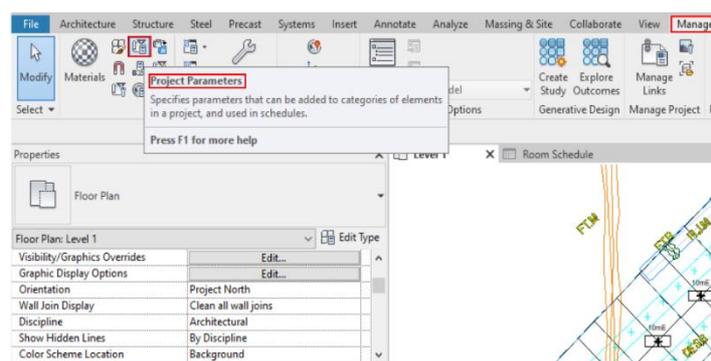


Figura 5.17 - Parâmetros de projeto

Para observar os parâmetros criados, é preciso selecionar uma dos *Rooms* criadas, procurar na janela do lado esquerdo e recolher toda a informação sobre esse bloco, ver Figura 5.19.

Os parâmetros adicionados estão relacionados com os critérios de pesquisa necessários para o caso de estudo, ver Figura 5.20.

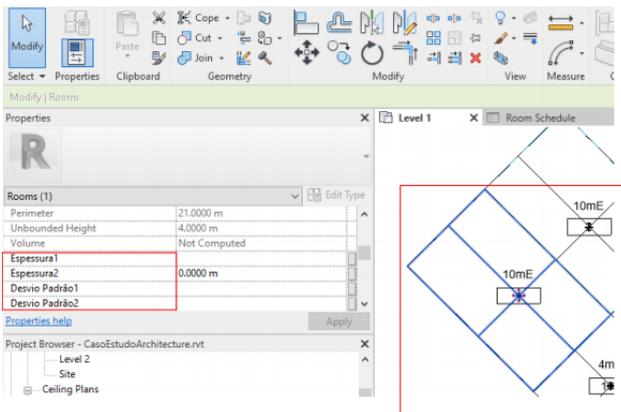


Figura 5.19 - Parâmetros adicionais

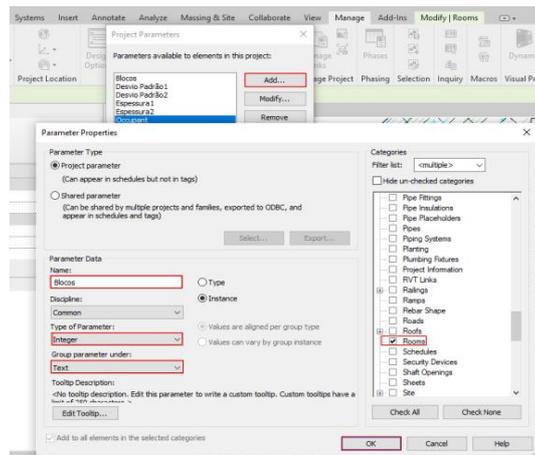


Figura 5.20 - Adicionar parâmetros

A fim de adicionar uma lista de componentes de elementos de construção ou pesquisar os parâmetros de projeto sempre que necessário, foi preciso efetuar os passos para o respectivo preenchimento, tal como se encontram legendados nas figuras abaixo.

Inicia-se por clicar na vista, "view", em seguida nos esquemas, "schedules", e seleciona-se a janela "Schedules/Quantities" para inserção de dados, ver Figura 5.21 e Figura 5.22.

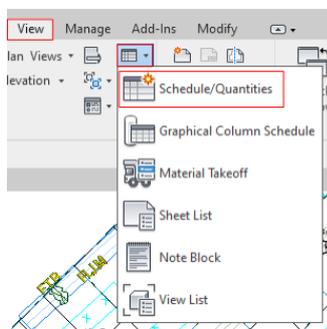


Figura 5.21 - Esquemas/Quantidades



Figura 5.22 - Dados de projeto

Atendendo a que os parâmetros já tinham sido criados anteriormente, basta adicionar esses mesmos parâmetros ao campo, "scheduled fields", ver Figura 5.23.

Depois de selecionar as opções desejadas no novo esquema, clicar em "ok" para avançar. Podem-se visualizar os novos esquemas, ver Figura 5.24.

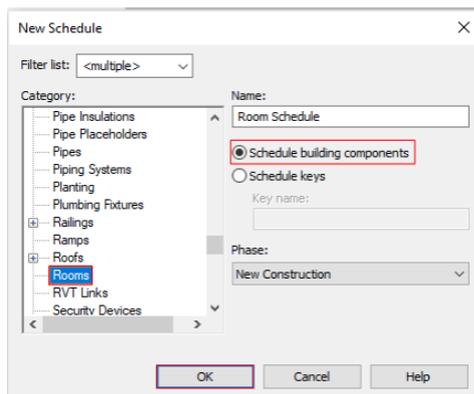


Figura 5.23 - Criação de novos esquemas

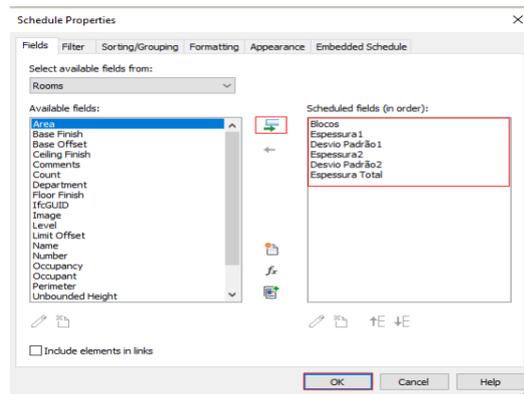


Figura 5.24 - Visualização de novos esquemas

Os dados do pavimento, nomeadamente as espessuras e o desvio padrão das camadas, e ainda a designação das parcelas "Rooms", são introduzidos diretamente no "Level" através dos "Rooms" criados anteriormente, ver Figura 5.25.

Em seguida, é aberta a tabela de esquemas com os parâmetros onde podem ser introduzidos ou apresentados os dados do pavimento, ver Figura 5.26.

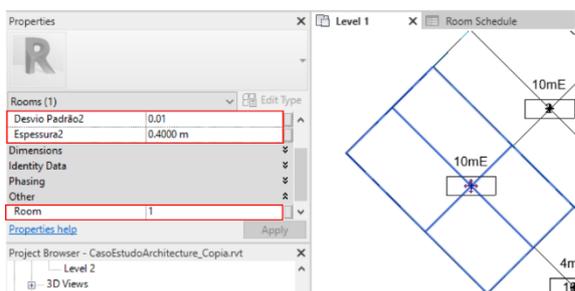


Figura 5.25 - Inserção de dados

<Room Schedule>					
A	B	C	D	E	F
Room	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total

Figura 5.26 - Esquema de quantidades

Para que o somatório de espessuras seja efetuado de forma automática, é preciso executar os passos que se podem observar nas figuras seguintes: Figura 5.27 - no campo "fields" clicar "edit" e na Figura 5.28 - abrir a janela das propriedades do esquema.

Ainda na janela da Figura 5.28, clicase no ícone "adicionar cálculo" no parâmetro "add calculated parameter" e, em seguida, escreve-se o nome e a fórmula no parâmetro que se pretende alterar.

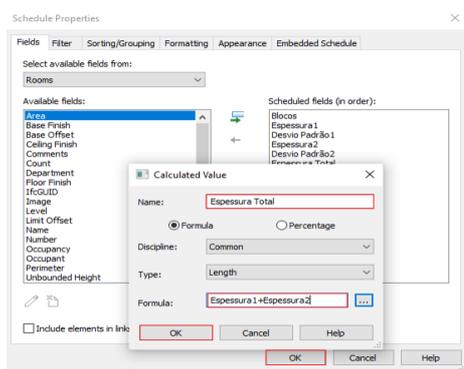


Figura 5.27 - Propriedades do esquema

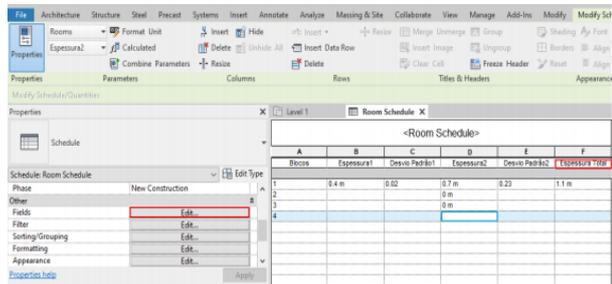


Figura 5.28 - Editar campos

A tabela, "room schedules", com todos os dados sobre as espessuras das camadas betuminosas e granulares encontra-se no Apêndice B.

## 5.6 Desvios das espessuras das camadas

Para poder apresentar os desvios relativamente às médias das espessuras das camadas em cada parcela, foi preciso trabalhar com legenda de cores, "color legend", onde foram definidos os critérios de pesquisa ou de comparação. Neste caso, decidiu-se comparar as espessuras das camadas e do pavimento no seu todo e ainda, verificar o seu desvio padrão. Nota-se que as espessuras máximas das camadas de materiais betuminoso e granular são de 43 cm e de 41 cm, respetivamente, perfazendo um total de 84 cm.

Começou-se primeiro por duplicar o pavimento em planta, "level 1", ver Figura 5.29 e Figura 5.30, a fim de salvar o ficheiro original e também porque era necessário fazer mais do que uma análise ao pavimento.

No nível 1, "level 1", clicou-se em primeiro lugar em anotar, "annotate", em seguida editou-se a legenda de preenchimento a cores, "color fill legend", ver Figura 5.30.

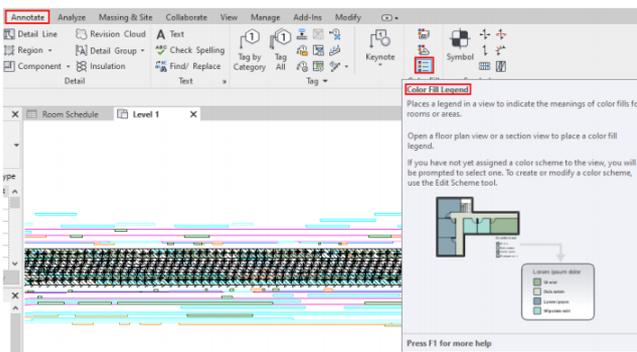


Figura 5.30 - Legenda de preenchimento de cores

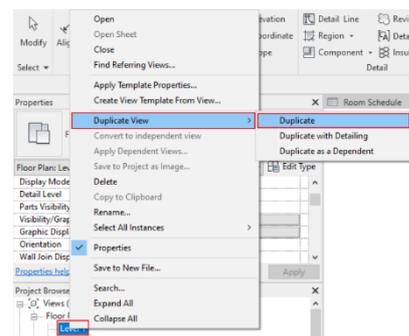


Figura 5.29 - Duplicação de vista em planta, "level 1"

Em seguida, abriu-se a janela de esquema de edição, "edit scheme", ver Figura 5.31, clicou-se em departamento de legenda, "department legend", em seguida, no esquema de edição, "edit scheme", abriu-se editar legenda de cor, "edit color legend", podendo assim criar-se uma nova legenda de cores, ver Figura 5.32.

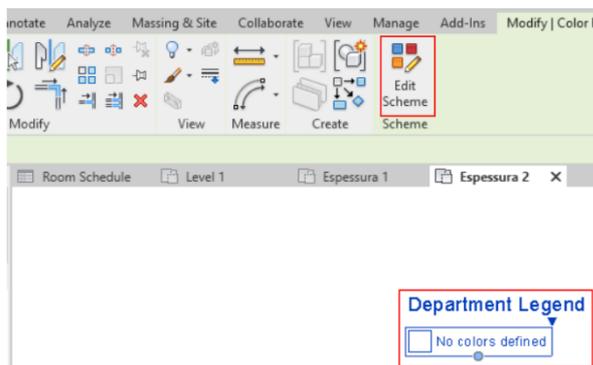


Figura 5.31 - Esquema de edição

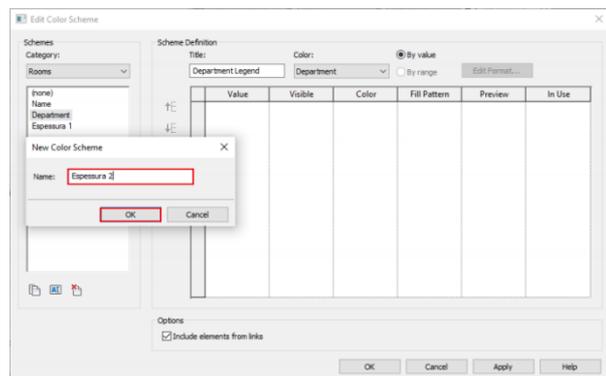


Figura 5.32 - Editar legenda de cor

Posto isto, no campo "color" seleciona-se uma legenda de cor para definir as cores e os critérios de pesquisa no intervalo de valores, "by range", ver Figura 5.33.

O valor base ou espessura ideal para o material betuminoso varia entre 35 cm e 43 cm; neste caso de estudo considerou-se 40 cm como o valor de projeto.

Assim, definiu-se: abaixo de 37 cm, vermelho; entre 37 e 38 cm laranja; entre 38 e 39 cm, amarelo-claro: entre 39 e 40 cm, verde-claro: entre 40 e 41 cm, anil e para maior que 41 cm, azul, ver Figura 5.34.

Importa realçar ainda que os resultados apresentados nestas figuras correspondem a uma distância entre 148 m e 180 m em relação ao início do CC.

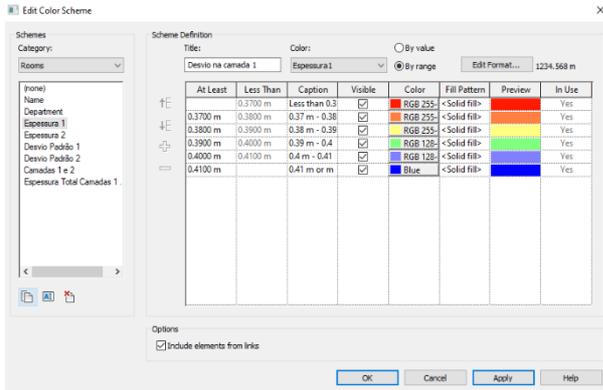


Figura 5.33 - Definição de intervalo de valores e cores para espessuras de camada betuminosa

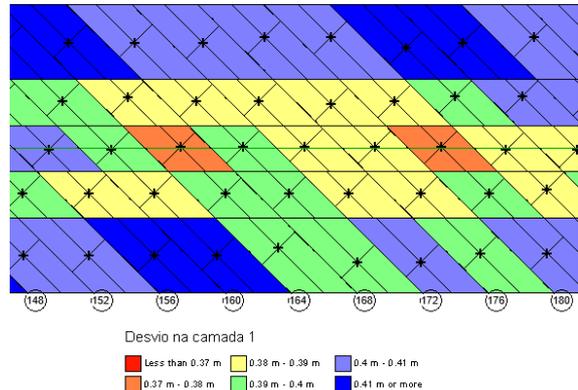


Figura 5.34 - Representação dos desvios nas espessuras da camada de material betuminoso

Neste caso de estudo foi analisado ainda o desvio padrão em relação às médias obtidas em cada parcela. Assim, atendendo à escala de cores selecionada, as zonas a azul têm dispersão desprezável, a azul-claro têm baixo grau de dispersão e de laranja-claro a vermelho correspondem a situações com maior grau de dispersão, ver Figura 5.35.

O desvio padrão é uma medida que expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados, indicando nível de uniformidade dos dados (quanto mais próximo de zero for o desvio padrão, mais homogêneos são os dados), ver Figura 5.36.

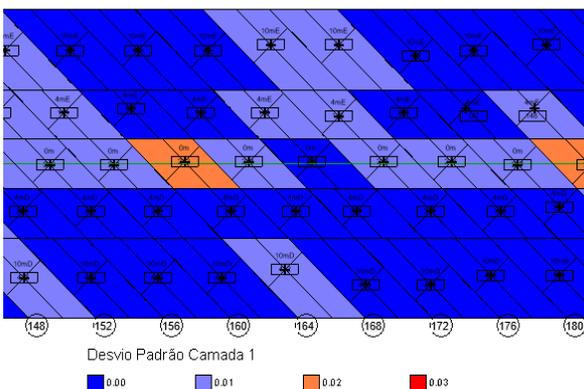


Figura 5.35 - Representação das dispersões nas espessuras da camada de material betuminoso

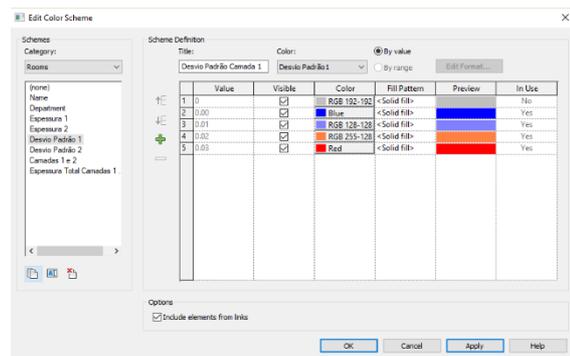


Figura 5.36 - Definição de cores para desvio padrão de espessuras da camada betuminosa

No que se refere à camada granular, definiu-se a seguinte escala de cores: vermelho para abaixo de 35 cm; laranja entre 35 e 37 cm; amarelo-claro entre 37 e 39 cm; verde-claro entre 39 e 41 cm; anil entre 41 e 43 cm; azul para maior que 43 cm, ver Figura 5.37.

Importa realçar-se que os resultados apresentados na (Figura 5.38) correspondem a uma distância entre 148 m e 192 m em relação ao início do CC.

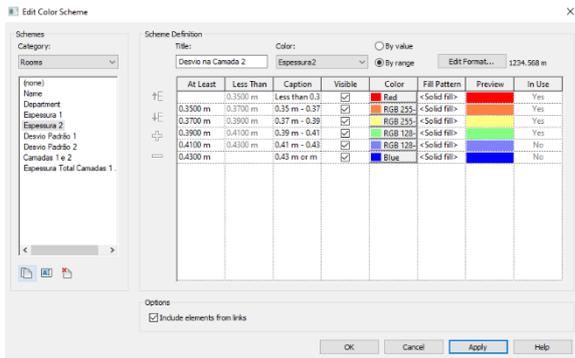


Figura 5.37 - Definição de intervalo de valores e cores para espessuras de camada granular

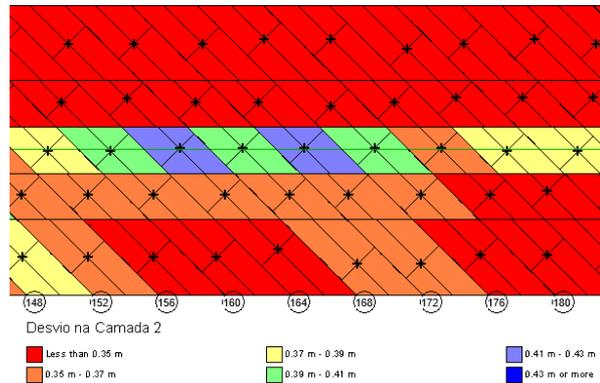


Figura 5.38 - Representação dos desvios nas espessuras da camada de material granular

Em relação ao desvio padrão das espessuras da camada granular, nas zonas a azul a dispersão é desprezável, a azul-claro têm baixo grau de dispersão e de laranja-claro a vermelho correspondem a situações com maior grau de dispersão, ver Figura 5.39. Foi ainda considerada a cor cinzenta para zonas onde não existe valor para o desvio padrão, visto não existirem valores para espessuras de camada granular, ver Figura 5.40.

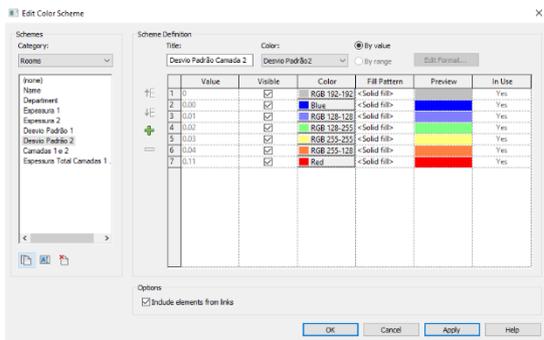


Figura 5.39 - Definição de cores para desvio padrão de espessuras da camada granular

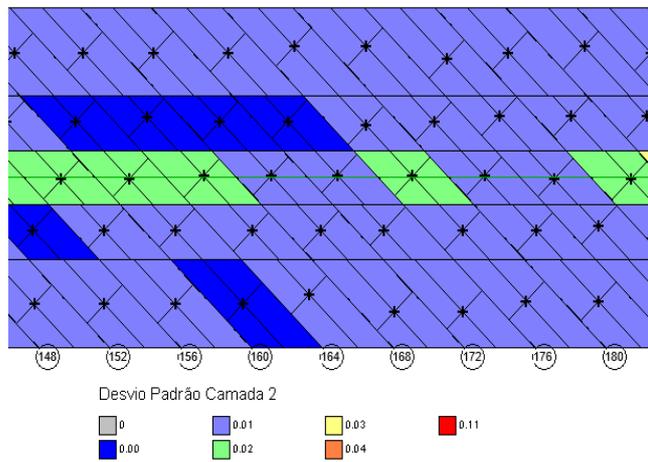


Figura 5.40 - Representação das dispersões nas espessuras da camada de material granular

Para uma melhor visualização destes desvios das espessuras das camadas e para obter uma melhor apreciação do pavimento em termos de defeitos estruturais e funcionais, foram realizados cortes com base no modelo BIM. Atendendo a que em alguns locais do pavimento só havia informação acerca da camada betuminosa, (nos primeiros 8 m de CC), resolveu-se fazer um corte transversal com escala de cores em uma destas zonas.

Os procedimentos para fazer estes cortes são: no nível 1, "level1" clicou-se no comando secção, "section", e, em seguida, fez-se o corte no local pretendido, ver Figura 5.41.

Após a execução do corte, o mesmo pode ser visto na secção de construção, "sections (building section)", com o nome atribuído ao corte transversal respetivo, ver Figura 5.42.

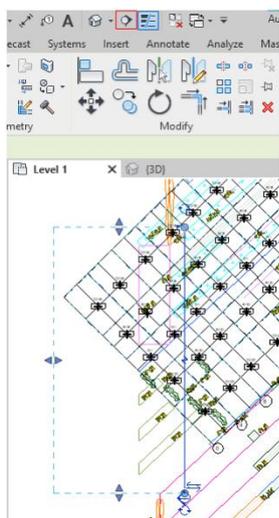


Figura 5.41 - Corte no Revit

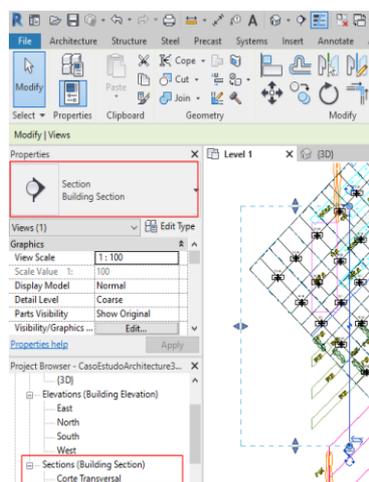
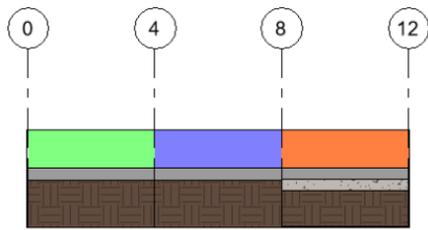


Figura 5.42 - Visualização de corte no Revit

Na Figura 5.43, é possível observar o corte transversal nos primeiros 12 m de comprimento e a 10 m à direita do eixo de CC, sendo o resultado apresentado com a escala de cores correspondente à camada betuminosa. É possível observar que nos primeiros 4 m a espessura é de 39 cm, logo está na escala entre 39 e 40 cm; entre 4 e 8 m a espessura é de 40 cm, logo está na escala entre 40 e 41 cm; e ainda entre 8 e 12 m a espessura é de 37 cm, logo está na escala entre 37 e 38 cm.

O corte transversal seguinte (Figura 5.43) é o mesmo que o anterior (Figura 5.42), mas o resultado apresentado com a escala de cores corresponde à camada granular, sendo possível observar que nos primeiros 8 m, não existindo a camada granular, e espessura está abaixo dos 35 cm; entre 8 e 12 m a espessura é de 34 cm, logo também está abaixo dos 35 cm, ver Figura 5.44.



Desvio na camada 1

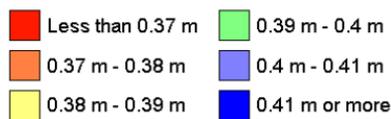
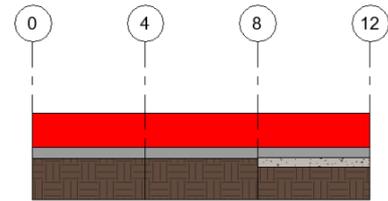


Figura 5.43 - Desvio no material betuminoso



Desvio na Camada 2

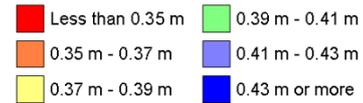
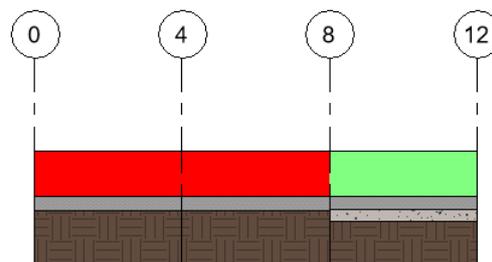


Figura 5.44 - Desvio no material granular

Na (Figura 5.45) é possível observar que nos primeiros 8 m as espessuras totais das camadas estão abaixo dos 45 cm, visto que não existe camada granular; por outro lado, entre 8 e 12 m a espessura total dos materiais (camadas betuminosa e granular) é de 71 cm, logo está entre 65 e 75 cm. A introdução da legenda de cores no modelo permitiu visualizar com clareza as zonas do caminho de circulação que têm desvios de espessuras, podendo concluir-se que estes estão concentrados nas bermas e nos 4 m do centrais do caminho de circulação, principalmente na camada granular.



Desvios ao longo das Camadas 1 e 2

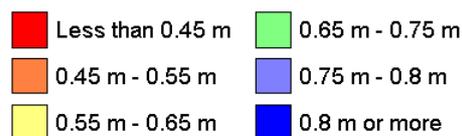


Figura 5.45 - Desvio na profundidade total

A Figura 5.46 mostra um trecho de CC entre os 164 m e os 208 m de comprimento e em 3D, onde existe a camada betuminosa mais á superfície, logo abaixo a camada granular e, por fim, o solo de fundação (terreno normal). É ainda apresentado um esquema de cores onde se podem observar os defeitos em termos de perdas de espessura total. É de notar que em nenhum destes pontos se mantém a espessura inicial de 80 cm; por outro lado, ao longo deste trecho a espessura total varia entre 65 cm e 79 cm. A introdução da legenda de cores no modelo permitiu a visualização com clareza das zonas do caminho de circulação que têm maiores ou menores espessuras, podendo concluir-se que estas variações estão concentrados nas bermas e nos 4 m do centro do caminho de circulação, como era de esperar.

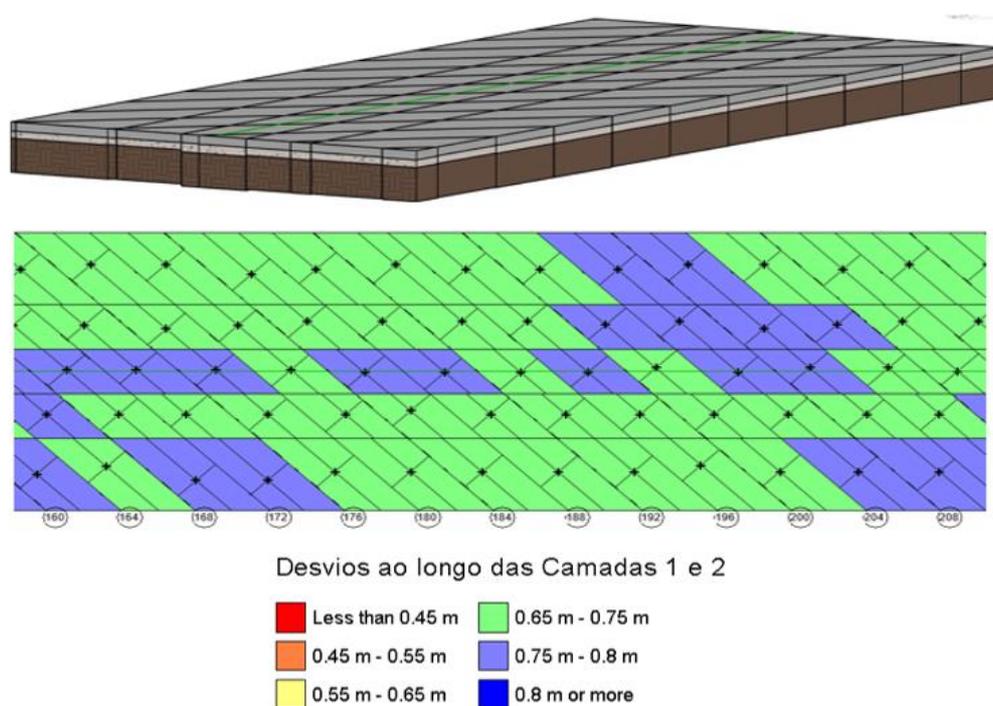


Figura 5.46 - Defeitos na profundidade total em 3D

Desta forma, conclui-se que o CC, neste trecho e no seu todo, como mostra a Figura 5.47, precisa de intervenção urgente ao nível da camada betuminosa para repor as suas condições normais de circulação, salvaguardando, assim, a segurança e conforto dos seus utilizadores visto que a espessura ideal para o somatório das duas camadas é de 80 cm.

Para uma melhor visualização e apreciação das camadas existente no PA do CC, as camadas subsequentes foram construídas com base na primeira camada (camada betuminosa). Ou seja, primeiramente fizeram-se cortes ao longo do pavimento com as camadas já construídas, em seguida, eliminaram-se as camadas com exceção da primeira camada e guarda-se. Depois, copiou-se a primeira camada e colou-se em baixo, deu-se um novo nome clicando em

duplicar, e atribui-se as definições a esta camada, guardando-se o resultado das alterações. Todos estes passos encontram-se no Apêndice A, de forma detalhada.

Os pontos a vermelho, ou seja, com menos de 55 cm de espessura, devem-se ao facto do GPR não ter conseguido fazer leitura ou recolher informação sobre uma das camadas; por isso, só identificou uma camada.

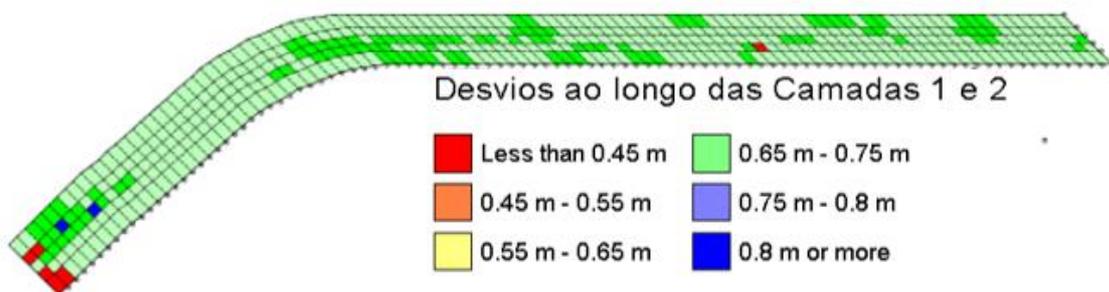


Figura 5.47 - Caminho de circulação com escala de cores

## 5.7 Considerações finais

Este capítulo da dissertação teve duas partes. Numa primeira fase explicou-se de forma didática e detalhada os passos e procedimentos executado no *Autodesk Revit* para que os utilizadores possam realizar os trabalhos futuros com a menor dificuldade possível e também para que os leitores possam compreender os passos dados. A segunda fase, que tinha como objetivo, analisar e monitorizar os dados fornecidos pelo GPR, em particular as espessuras das camadas betuminosa e granular do pavimento flexível, por intermédio de imagens e tabelas extraídos do GPR de uma pista de circulação aeroportuária portuguesa. Por outro lado, colocou-se esta informação no Revit para obter uma visualização real das variações das espessuras das camadas em 2D, por intermédio de plantas e cortes, e ainda obter uma outra visualização em 3D. A introdução da legenda de cores no modelo permitiu a visualização com clareza das zonas do caminho de circulação em que se verificam desvios de espessuras, podendo concluir-se que estes desvios estão concentrados nas bermas e nos 4 m do centrais do caminho de circulação, como era de esperar.

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

Esta dissertação permitiu atingir os objetivos propostos inicialmente, contribuindo para a sistematização da monitorização de pavimentos com o GPR, através da utilização de metodologias mais recentes de integração da informação e de visualização, como o BIM. Para este efeito foi apresentada uma aplicação a um caso de estudo, para validação da metodologia desenvolvida. Foi ainda adquirido um conhecimento mais aprofundado no que diz respeito às técnicas de monitorização de pavimentos, assim como das variáveis, critérios e fatores que influenciam a avaliação rigorosa de pavimentos aeroportuários.

Relativamente aos pavimentos aeroportuários, fez-se uma breve descrição sobre os pavimentos e, em particular, pavimentos flexíveis aeroportuários no que se refere a sua constituição, funcionamento, exigências funcionais e estruturais e métodos para a determinação das espessuras, sua constituição e monitorização e deteção das suas degradações, por se tratar do tipo de pavimento aeroportuário mais utilizado em Portugal.

Neste sentido, desenvolveram-se metodologias de visualização de dados, da espessura das camadas e respetivo desvio padrão, avaliadas com recurso ao GPR. A dissertação permitiu demonstrar alguns princípios do GPR, o seu funcionamento e aplicabilidade, a importância da realização de ensaios não destrutivos e de uma análise e interpretação de dados eficiente e rigorosa.

O BIM tem sido mais aplicado em edifícios, mas também é pertinente a sua aplicação em infraestruturas de transporte, nomeadamente em pavimentos rodoviários, aeroportuários e vias férreas, para incluir dados de monitorização obtidos com GPR. No âmbito desta dissertação, demonstrou-se a contribuição da aplicação da metodologia BIM na modelação e avaliação do estado de um caminho de circulação aeroportuário em serviço. Demonstrou-se ainda que esta metodologia pode ser implementada em sistemas de gestão de infraestruturas aeroportuárias, possibilitando o registo das suas características físicas e geométricas, bem como os dados de monitorização dos pavimentos, recolhidos a partir do Radar de Prospeção, ao longo de vida útil da infraestrutura.

Os principais desafios desta dissertação foram a familiarização com a metodologia BIM e a utilização dos respetivos *softwares*. Os passos seguidos para ultrapassar estes desafios são

apresentados no capítulo do caso de estudo, podendo constituir recomendações de boas práticas para quem iniciar estudos na digitalização de informação. Algumas das dificuldades encontradas foram relativas à aplicação e definição de camadas betuminosas, granulares e de fundação e ainda, a divisão do pavimento transversalmente em 5 seções, por forma a integrar os resultados medidos com GPR nos diferentes alinhamentos. Foi ainda um desafio ultrapassado a definição e aplicação das escalas de cores no *software* BIM, com a finalidade de distinguir os desvios de espessura existente entre as camadas betuminosas e granulares em cada uma das cinco secções previamente definidas.

No âmbito do caso de estudo, foram analisados os dados fornecidos pelo GPR, em particular as espessuras das camadas betuminosa e granular do pavimento flexível, por intermédio de imagens e tabelas extraídos do GPR, de um caminho de circulação de um aeroporto nacional. De seguida, foi construído um modelo digital do caminho de circulação em estudo, onde foi inserida a informação resultante da monitorização com GPR sobre a espessura das camadas constituintes. Foi desenvolvida uma metodologia para visualização das variações das espessuras das camadas, por intermédio de plantas e cortes, e ainda, através do modelo digital em 3D do caminho de circulação. A introdução da legenda de cores no modelo permitiu uma visualização evidente das zonas do caminho de circulação que apresentam espessuras diferentes relativamente à espessura de projeto (para mais ou para menos). Foi possível assim observar que, no presente caso de estudo, as variações de espessura estavam localizadas predominantemente nas bermas e na zona central do caminho de circulação.

Posto isto, espera-se que o trabalho desenvolvido nesta dissertação possa vir a contribuir para um melhor aproveitamento dos dados resultantes da inspeção de via com GPR e, consequentemente, para um planeamento mais eficiente das medidas de manutenção e reabilitação das infraestruturas rodoviárias e aeroportuárias.

## 6.2 Desenvolvimentos futuros

No âmbito dos desenvolvimentos futuros, o modelo digital BIM desenvolvido poderá ser alargado para a visualização integral do caminho de circulação, e dos restantes pavimentos do aeroporto em estudo, com particular atenção para integração de alinhamentos medidos com o GPR nos cruzamentos de pavimentos.

Ainda neste modelo digital poderão ser integrados os dados de avaliação funcional e estrutural de pavimentos, como por exemplo: degradações observadas na inspeção visual, dados recolhidos através da realização de sondagens à rotação e poços, de deflexões medidas em ensaios de carga com o defletómetro de impacto, etc.

Para além da metodologia estudada e apresentada neste estudo, podem ser estudadas e aplicadas outras formas de inserção de dados e informação de monitorização de infraestruturas de transportes em modelos BIM.

## BIBLIOGRAFIA

- Fontul, S. et al. 2018.** *Railway Track Condition Assessment at Network Level by Frequency Domain Analysis of GPR.*
- Allied. 2019.** *Associates Geophysical LTD.* [Online] 2019. <https://www.allied-associates.com/solutions/gssi-1-6ghz-antenna>.
- Alves, C. M. F., et al. 2012.** *O que são os BIM? Faculdade de Engenharia da Universidade Do Porto.* Porto.
- Alves, T. 2007.** *Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários aplicação prática do radar de prospecção e do deflectómetro de impacto.* Lisboa : Instituto Superior Técnico. Dissertação de Mestrado.
- ANAC. 2018.** *Aerodrómos - Características Físicas e Ajudas Visuais,* p. 5.
- Barbosa, J., et al. 2010.** *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.*
- Biblus. 2022.** <https://biblus.accasoftware.com/ptb/construcao-industrializada-conheca-o-bim-10d/>. [Online] 17 de janeiro de 2022. [Citação: 12 de outubro de 2022]. <https://biblus.accasoftware.com/ptb/construcao-industrializada-conheca-o-bim-10d>.
- Bilal, Succar. 2010.** "The five components of BIM performance measurement". *Comunicação apresentada em Proceedings of CIB World Congress, Salford.*
- Brandão, R. e Ferreira, E. 2015.** *Aplicação do BIM no Estudo de Obra de Infraestrutura Viária e de Terraplanagem,* p. 48.
- Brito, R. 2022.** *Gestão de Infraestruturas Rodoviárias. Importância da Monitorização e dos Indicadores de Desempenho para a Tomada de Decisão.* Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do Grau de Mestre. | FCT NOVA. Almada.
- Caeiro, A. 2021.** *Implementação da Metodologia BIM no Desenvolvimento de Projetos de Estruturas.* Dissertação de natureza científica para a obtenção do grau de Mestre. instituto superior de engenharia de lisboa.
- Carvalho, P. 2016.** *análise estatística do estado de implementação da tecnologia bim no setor da construção em portugal.* Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em engenharia civil – especialização em construções. Departamento de engenharia civil, faculdade de engenharia da universidade do porto, Porto.

- Daniels, D.J.(Ed.). 2004.** *Ground Penetrating Radar (2nd Edition)*. s.l. : IEE, ISBN 0-86341-360-9, London.
- Darós, José. 2017.** *Guia completo: BIM 10D construção industrializada. Building Information Modeling, D's do BIM.* [Online]. [Citação: 22 de Setembro de 2022]. <https://utilizandobim.com/blog/bim-10d-construcao-industrializada>.
- Davis, J. e Annan, A. 1989.** *ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy1*.
- Davis, J.L. e Annan, A.P. 1989.** *Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting.* 1989, Vol. Vol.37, pp. 531-551.
- De Chiara, F., Fontul, S. e Fortunato, E. 2014.** *GPR Laboratory Tests for Railways Materials Dielectric Properties Assessment.* Remote Sens. 2014, 6(10), 9712–9728. DOI: 10.3390/rs6109712.
- Eastman, Chuck, et al. 2011.** *BIM Handbook - A guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors.* New Jersey, US: John Wiley & Sons eds.
- Falcão S., M.J., et al. 2015.** *Desenvolvimento de bim em portugal: contributo para um sector aec sustentável.*
- Fontul, S. 2021.** *Acetatos das aulas da disciplina Infraestruturas Rodoviárias e Ferroviárias.* | FCT NOVA.
- Fontul, S. e Antunes, M. 2022.** *Aplicação de redes neuronais artificiais na avaliação estrutural de pavimentos.* Transportes e Conselho Diretivo, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal.
- Fontul, S. 2004.** *Structural evaluation of flexible pavements using non-destructive tests.* Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Fontul, S., et al. 2007.** *Practical application of GPR in transport infrastructure survey.* Proc. International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials.
- Fontul, S., et al. 2018.** *Railway Track Condition Assessment at Network Level by Frequency Domain Analysis of GPR Data.* s.l. : Remote Sens. 2018, 10(4), 559. DOI: 10.3390/rs10040559.
- Fontul, S., et al. 2016.** *Railways Track Characterization Using Ground Penetrating Radar.* s.l. : Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016). DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.120.
- Forensic investigations of roadway pavement failures.*
- Chen, D.H e Scullion, Tomy. 2008.** *Journal of Transportation Engineering ASCE,* January/February.
- Gledson, B. , Henry, D. e Bleanch, P. 2012.** *does size matter? experiences and perspectives ofbim implementation fromlarge and sme construction contractors.*
- Grani, H. 2016.** *BIM Interoperability - is the industry sailing under false colors?*

- Granja, J. e Martins, J. 2022.** *4º Congresso Português de Building Information Modelling vol. 1 - ptBIM.*
- GSSI. 2022.** [Online] 2022. <https://www.geophysical.com/antennas>.
- Jimenez. 2010.** *Manual de Pavimentação.* Lisboa : CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A.
- Kazunori, T., et al. 2012.** *Basics and Application of Ground- Penetrating Radar as a Tool for Monitoring Irrigation Process.*
- Khemlani, Lachmi. 2011.** *CORENET e-PlanCheck: Singapore's Automated Code Checking System.* AECbytes.
- Knittle, B. 2014.** *Understanding the Flavors of Revit.*
- Knödel, K., Lange, G. e Voigt (Eds.), H.J. 2007.** *Environmental Geology, Handbook of Field Methods and Case Studies.* Berlin : ISBN 978-3-540-74669-0.
- Lai, H. e Deng, X. 2018.** *interoperability analysis of ifc-based data. exchange between heterogeneous bim software. Journal of Civil Engineering and Management, 24(7), 537-555.*
- Lopes, A. 2013.** *Avaliação da degradação de vias férreas. Dissertação apresentada da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Perfil de Estruturas e Geotecnia.* Universidade Nova de Lisboa.
- Lopes, J. 2017.** *BIM Application in the Evaluation of Airport. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Perfil de Construção.* Universidade Nova de Lisboa.
- Lopes, J., et al. 2018.** *A avaliação de infraestruturas aeroportuárias. proposta para integração de dados em bim. 2º Congresso Português de Building Information Modelling.*
- Maia, Celestino, et al. 2012.** *O que são os BIM? Mestrado Integrado em Engenharia Civil.*
- Manico, H. 2018.** *Pavimentos rodoviários flexíveis em Angola. Caracterização e aplicação de metodologias BIM. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Perfil de Estruturas.* FCT NOVA.
- Marecos, V. 2018.** *Optimisation of Ground Penetrating Radar testing at traffic speed for structural monitoring of pavements. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil.* Universidade de Vigo.
- Marecos, V., et al. 2015.** *Assessment of a concrete pre-stressed runway pavement with ground penetrating radar. Proc. 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 7-10 Julho, Florença, Italia, pp. 1-4. DOI: 10.1109/IWAGPR.2015.7292635.*
- Marecos, V., et al. 2017.** *Evaluation of a highway pavement using non-destructive tests: Falling weight deflectometer and ground penetrating radar. Construction and building materials, pp.154, 1164-1172. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.034.*
- Marecos, V., et al. 2017.** *Evaluation of a highway pavement using non-destructive: Falling weight deflectometer and ground penetrating radar. Construction and building materials, pp. 154, 1164-1172.*
- Marinho, David, et al. 2018.** *Construção 2018 - Reabilitar e Construir de Forma Sustentável. Avaliação Patrimonial de Imóveis Apoiada na Metodologia BIM.*

- Bedford, 2012.** *Mcgraw hill construction. The Business Value of BIM for Infrastructure: Addressing America's Infrastructure Challenges with Collaboration and Technology.* Bedford.
- Mn/DOT. 2011.** *Pavement Distress Identification Manual.*
- Motta, L., et al. 2008.** *Pavimentação Asfáltica. Formação Básica Para Engenheiros.* Rio de Janeiro. Brasil.
- Oaci, anexo 14 - Volume I. 2016.** *Diseño y operaciones de aeródromos.* Séptima edición, Vol. I.
- Peças, João. 2021.** *Acetatos das aulas de Gestão da Construção.*
- Rasol, M., et al. 2022.** GPR monitoring for road transport infrastructure: a systematic review and machine learning insights. *Construction and Building Materials.* Vol. 324 (2022), pp. 126686, 10.1016/j.conbuildmat.2022.126686.
- Ribeiro, Martim. 2016.** *Implementação do modelo de informação integrado no bim. dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre em engenharia civil – especialização em construções,* porto : faculdade de engenharia da universidade do porto.
- Rodrigues Lopes, Edgar. 2010.** *Contributo para o estudo da utilização do deflectómetro de impactoligeiro.*
- Rustler, W. 2017.** *Building Information Modeling and Structural Analysis Software: Scenarios and Success Factors for Data Exchange | Dlubal Software.*
- Silva, M, Paula, Couto e Fontul, Simona. 2020.** *aplicação de bim em infraestruturas de transportes. ptBIM 2020 3º Congresso Português de Building Information Modelling, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.*
- Silva, Maria, Paula, Couto e Fernando, Pinho. 2020.** *laser scanning no apoio à reabilitação funcional de um edifício. 4º encontro de conservação e reabilitação de edifícios.*
- Sinclair, D. 2012.** *BIM Overlay to the RIBA Outline Plan of Work.*
- Smith, S.S. e Scuilion, T. 1993.** *Development of ground-penetrating radar equipment for detecting pavement condition for preventive maintenance. GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights,* p. 188.
- Solla, Mercedes, Pérez-Gracia, V. e Fontul, Simona. 2021.** *A Review of GPR Application on Transport Infrastructures: Troubleshooting and Best Practices.* s.l. : Remote Sens. 2021, 13, 672. <https://doi.org/10.3390/rs13040672>.
- Takahashi, Kazunori , et al. 2012.** *Basics and Application of Ground- Penetrating Radar as a Tool for Monitoring Irrigation Process.*
- Ulriksen, P. 1982.** *Application of impulse radar to civil engineering. Doctoral Thesis.* Lund: Lund University of technology.
- Waldeck Consulting. 2016.** *Building Information Modeling.*

## APÊNDICE A

Neste apêndice segue-se os passos necessários para a criação de um outro material que não haja na lista de materiais do Revit, da 2ª camada (camada granular) e a forma de criar as camadas para serem visíveis ou trabalhadas em 3D.

### A.1 Criação de um material

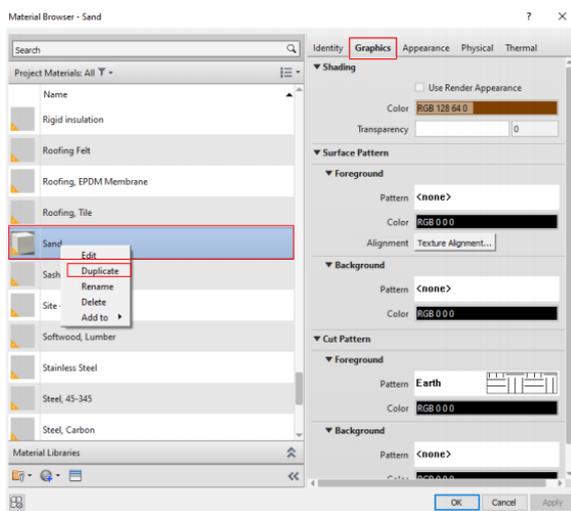


Figura A1.1 – Passo 1 - Duplicação do material

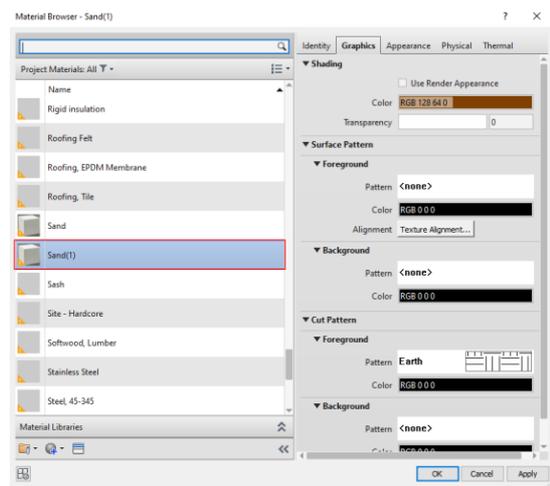


Figura A1.2 – Passo 2 - Material duplicado

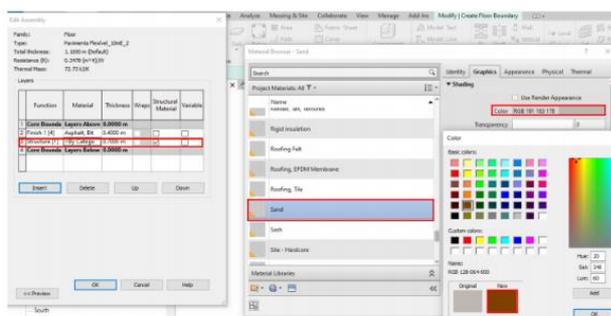


Figura A1.4 – Passo 3 - Padrão de preenchimento

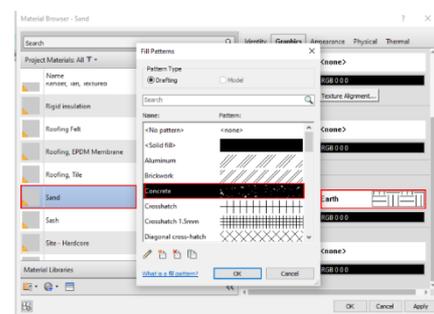


Figura A1.3 – Passo 4 - Alteração de cor

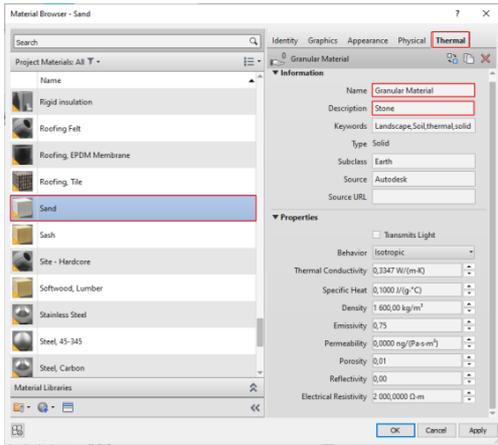


Figura A1.5 – Passo 5 - Alteração do nome da camada atual

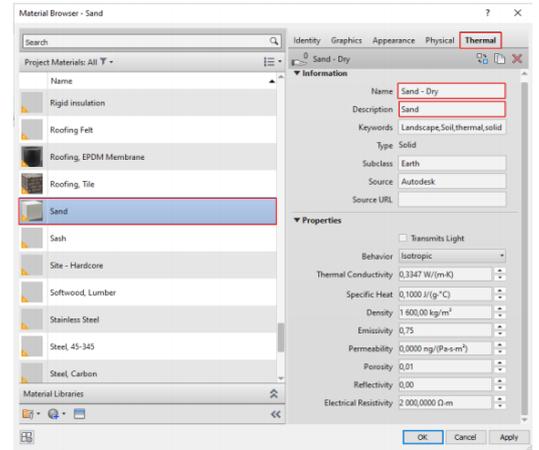


Figura A1.6 – Passo 6 - Nome da camada atual

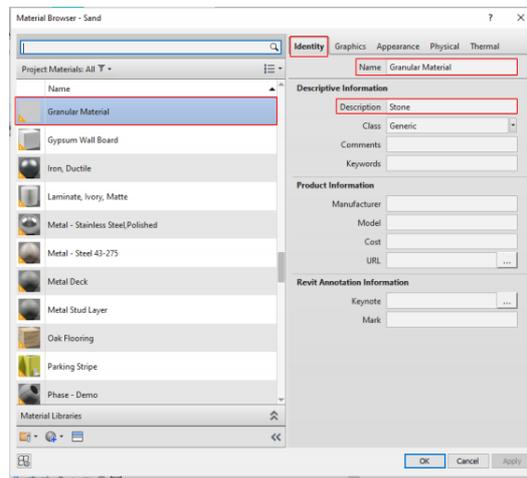


Figura A1.7 – Passo 7 - Camada granular (pedra)

## A.2 Criação de segunda camada

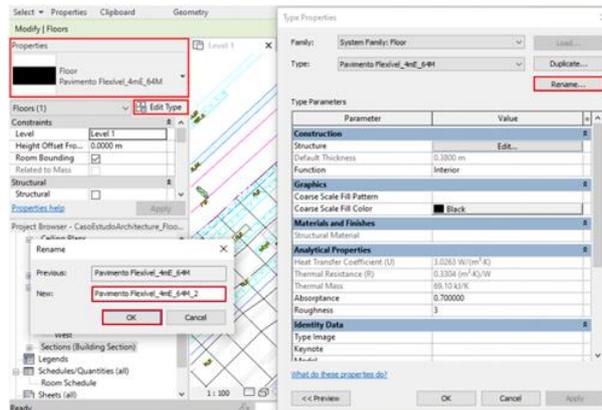


Figura A2.1 – Passo 1 - Renomear a primeira camada

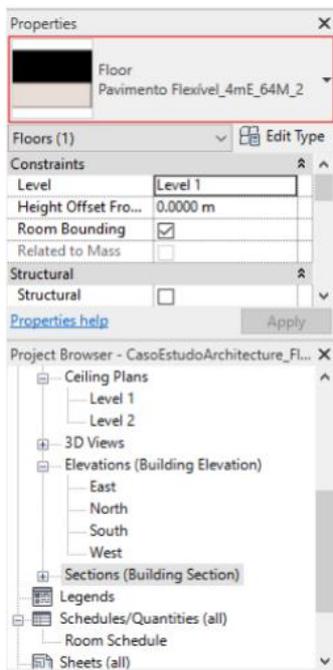


Figura A2.3 – Passo 3 - Inserir 2ª camada

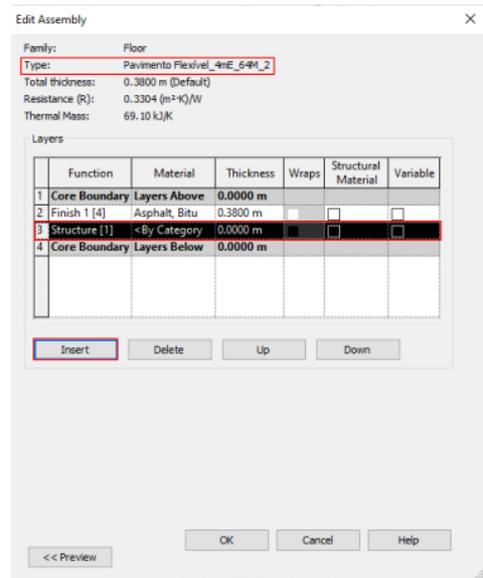


Figura A2.2 – Passo 2 - 2ª camada nomeada

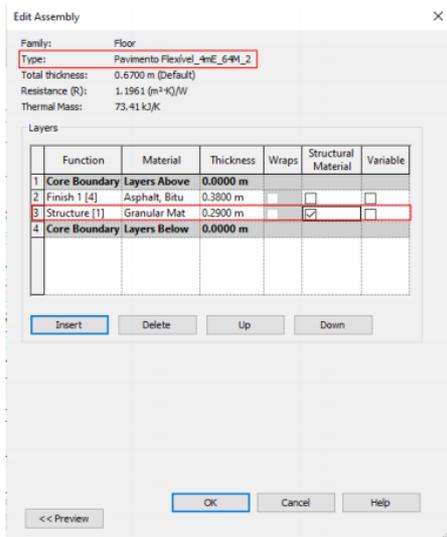


Figura A2.4 – Passo 4 - 2ª camada definida

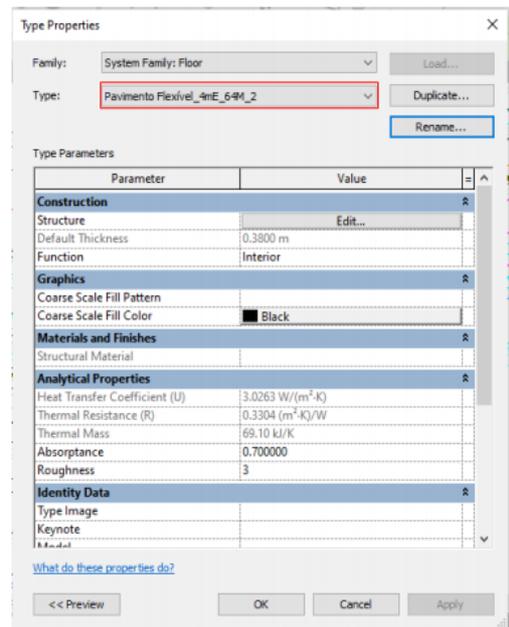


Figura A2.5 – Passo 5 - Definição da 2ª camada

## A.3 Visualização das camadas em 3D

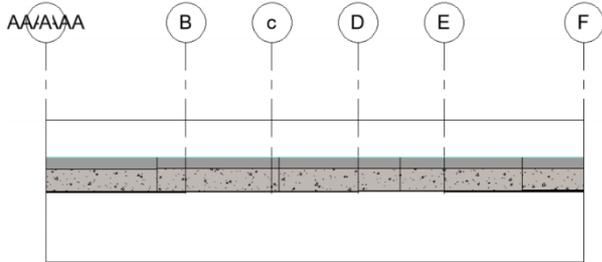


Figura A3.1 – Passo 1 - Corte em 2D do pavimento inicial

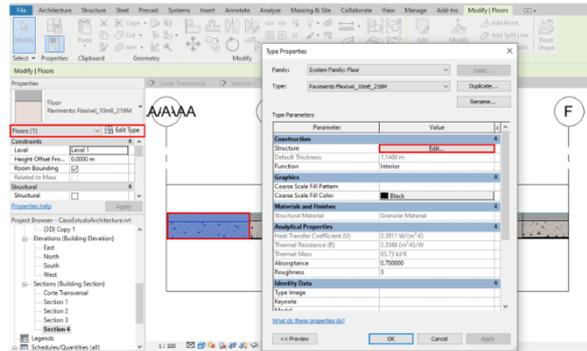


Figura A3.2 – Passo 2 - Edição das camadas

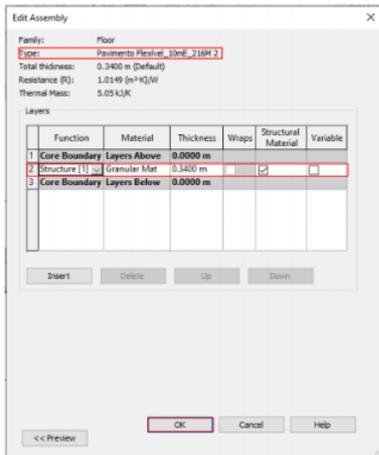


Figura A3.4 – Passo 4 - Eliminação da 2ª camada

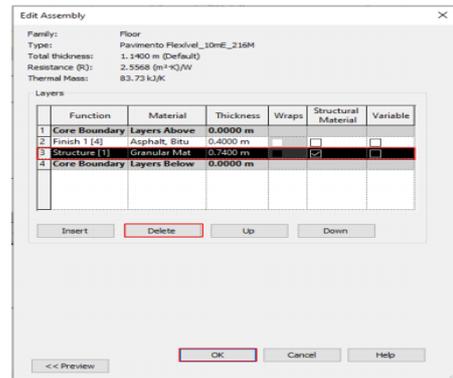


Figura A3.3 – Passo 3 - Duplicação da 1ª camada

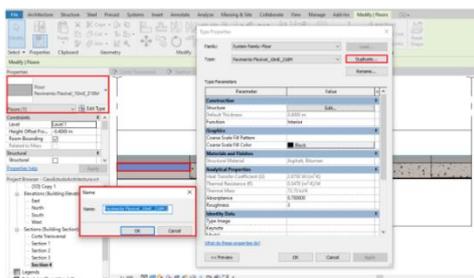


Figura A3.5 – Passo 5 - Definição da 2ª camada

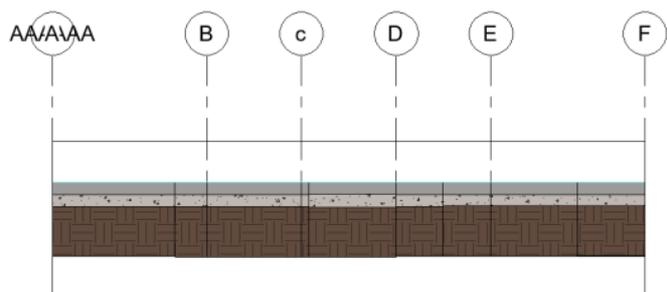


Figura A3.6 – Passo 6 - Corte em 2D do pavimento final com terreno natural

Neste apêndice consta o caminho de circulação com os primeiros 400m pavimentada no Revit e a tabela com as dimensões das espessuras das camadas betuminosas e granulares e o valor do desvio padrão essencialmente.

### B.1 Pavimentos "Floors"

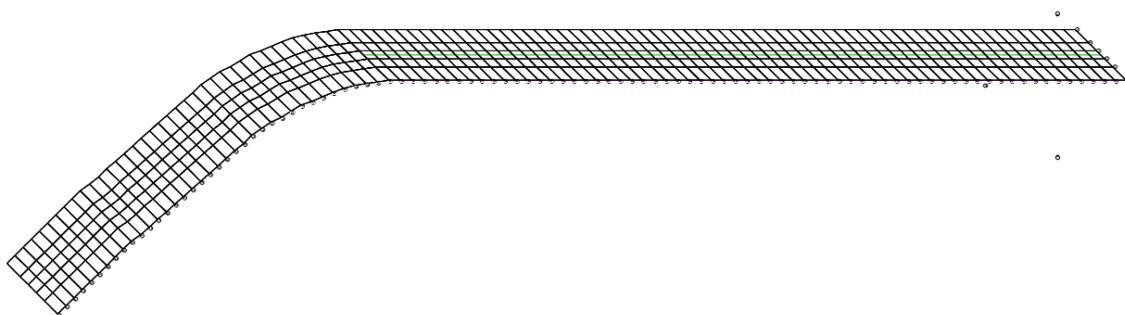


Figura B1. 1 – Caminho de circulação pavimentado ao longo de 400 m

## B.2 Zooms Schedule

Tabela B2. 1 – Rooms 1-27

<Room Schedule>						
A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
1	0.4 m	0.02	0.32 m	0.11	0.72 m	4 m
2	0.35 m	0.01	0.36 m	0.02	0.71 m	8 m
3	0.37 m	0.01	0.4 m	0.01	0.77 m	12 m
4	0.38 m	0.01	0.41 m	0.02	0.79 m	16 m
5	0.4 m	0.00	0.37 m	0.01	0.77 m	20 m
6	0.4 m	0.00	0.35 m	0.01	0.75 m	24 m
7	0.4 m	0.00	0.32 m	0.01	0.72 m	28 m
8	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	32 m
9	0.4 m	0.00	0.34 m	0.01	0.74 m	36 m
13	0.39 m	0.00	0.3 m	0.01	0.69 m	52 m
10	0.41 m	0.01	0.31 m	0.01	0.72 m	40 m
11	0.4 m	0.01	0.33 m	0.02	0.73 m	44 m
12	0.4 m	0.00	0.3 m	0.01	0.7 m	48 m
13	0.39 m	0.00	0.3 m	0.01	0.69 m	52 m
14	0.38 m	0.00	0.3 m	0.01	0.68 m	56 m
15	0.37 m	0.00	0.3 m	0.01	0.67 m	60 m
16	0.38 m	0.01	0.3 m	0.01	0.68 m	64 m
17	0.4 m	0.00	0.31 m	0.01	0.71 m	68 m
19	0.4 m	0.00	0.33 m	0.02	0.73 m	76 m
20	0.32 m	0.01	0.32 m	0.02	0.64 m	80 m
21	0.38 m	0.02	0.32 m	0.01	0.7 m	84 m
22	0.37 m	0.00	0.32 m	0.01	0.69 m	88 m
23	0.38 m	0.00	0.33 m	0.01	0.71 m	92 m
24	0.39 m	0.00	0.32 m	0.02	0.71 m	96 m
25	0.37 m	0.00	0.34 m	0.01	0.71 m	100 m
26	0.37 m	0.00	0.32 m	0.01	0.69 m	104 m
27	0.39 m	0.01	0.32 m	0.01	0.71 m	108 m

Tabela B2. 2 – Rooms 28-56

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
28	0.38 m	0.01	0.33 m	0.02	0.71 m	112 m
29	0.38 m	0.00	0.36 m	0.01	0.74 m	116 m
18	0.41 m	0.00	0.33 m	0.01	0.74 m	72 m
30	0.38 m	0.02	0.36 m	0.01	0.74 m	120 m
31	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	124 m
32	0.39 m	0.00	0.34 m	0.01	0.73 m	128 m
33	0.37 m	0.00	0.33 m	0.01	0.7 m	132 m
34	0.38 m	0.01	0.33 m	0.01	0.71 m	136 m
35	0.4 m	0.01	0.33 m	0.01	0.73 m	140 m
36	0.42 m	0.02	0.32 m	0.02	0.74 m	144 m
37	0.4 m	0.01	0.33 m	0.01	0.73 m	148 m
38	0.4 m	0.00	0.34 m	0.01	0.74 m	152 m
39	0.39 m	0.00	0.32 m	0.01	0.71 m	156 m
40	0.39 m	0.01	0.31 m	0.01	0.7 m	160 m
41	0.41 m	0.01	0.31 m	0.01	0.72 m	164 m
42	0.41 m	0.00	0.3 m	0.01	0.71 m	168 m
43	0.4 m	0.00	0.29 m	0.01	0.69 m	172 m
44	0.4 m	0.00	0.3 m	0.01	0.7 m	176 m
45	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	180 m
46	0.4 m	0.01	0.31 m	0.01	0.71 m	184 m
47	0.41 m	0.00	0.32 m	0.01	0.73 m	188 m
48	0.41 m	0.00	0.32 m	0.01	0.73 m	192 m
49	0.4 m	0.00	0.32 m	0.01	0.72 m	196 m
50	0.4 m	0.00	0.34 m	0.01	0.74 m	200 m
51	0.4 m	0.00	0.34 m	0.01	0.74 m	204 m
52	0.4 m	0.01	0.35 m	0.02	0.75 m	208 m
53	0.39 m	0.01	0.36 m	0.01	0.75 m	212 m
54	0.4 m	0.00	0.34 m	0.01	0.74 m	216 m
55	0.41 m	0.01	0.33 m	0.01	0.74 m	220 m
56	0.4 m	0.00	0.34 m	0.01	0.74 m	224 m

Tabela B2. 3 – Rooms 57 - 92

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
57	0.4 m	0.01	0.34 m	0.01	0.74 m	228 m
58	0.4 m	0.01	0.32 m	0.02	0.72 m	232 m
59	0.4 m	0.00	0.31 m	0.01	0.71 m	236 m
60	0.4 m	0.01	0.31 m	0.01	0.71 m	240 m
61	0.4 m	0.00	0.3 m	0.00	0.7 m	244 m
62	0.39 m	0.00	0.31 m	0.01	0.7 m	248 m
63	0.39 m	0.01	0.35 m	0.01	0.74 m	252 m
64	0.4 m	0.01	0.34 m	0.02	0.74 m	256 m
65	0.41 m	0.01	0.31 m	0.02	0.72 m	260 m
66	0.42 m	0.01	0.34 m	0.01	0.76 m	264 m
67	0.41 m	0.01	0.35 m	0.01	0.76 m	268 m
68	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	272 m
69	0.39 m	0.01	0.33 m	0.01	0.72 m	276 m
70	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	280 m
71	0.42 m	0.00	0.3 m	0.01	0.72 m	284 m
72	0.41 m	0.01	0.31 m	0.01	0.72 m	288 m
73	0.4 m	0.01	0.31 m	0.02	0.71 m	292 m
74	0.41 m	0.00	0.3 m	0.01	0.71 m	296 m
75	0.42 m	0.00	0.29 m	0.01	0.71 m	300 m
76	0.42 m	0.00	0.3 m	0.01	0.72 m	304 m
77	0.42 m	0.00	0.31 m	0.01	0.73 m	308 m
78	0.42 m	0.00	0.34 m	0.01	0.76 m	312 m
79	0.41 m	0.00	0.35 m	0.01	0.76 m	316 m
80	0.41 m	0.00	0.35 m	0.01	0.76 m	320 m
81	0.41 m	0.00	0.35 m	0.01	0.76 m	324 m
82	0.41 m	0.00	0.33 m	0.01	0.74 m	328 m
83	0.4 m	0.01	0.35 m	0.01	0.75 m	332 m
84	0.4 m	0.00	0.35 m	0.01	0.75 m	336 m
85	0.39 m	0.00	0.34 m	0.01	0.73 m	340 m
92	0.4 m	0.01	0.36 m	0.01	0.76 m	368 m

Tabela B2. 4 – Rooms 93 - 124

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
93	0.4 m	0.00	0.35 m	0.01	0.75 m	372 m
94	0.4 m	0.00	0.34 m	0.01	0.74 m	376 m
95	0.39 m	0.00	0.33 m	0.01	0.72 m	380 m
96	0.39 m	0.00	0.34 m	0.01	0.73 m	384 m
97	0.39 m	0.00	0.35 m	0.01	0.74 m	388 m
98	0.38 m	0.00	0.34 m	0.01	0.72 m	392 m
99	0.39 m	0.01	0.34 m	0.01	0.73 m	396 m
100	0.39 m	0.00	0.33 m	0.01	0.72 m	400 m
101	0.38 m	0.01	0 m	0	0.38 m	4 m
102	0.37 m	0.01	0 m	0	0.37 m	8 m
103	0.37 m	0.00	0.39 m	0.01	0.76 m	4 m
104	0.39 m	0.01	0.4 m	0.01	0.79 m	8 m
105	0.4 m	0.00	0.4 m	0.01	0.8 m	12 m
106	0.4 m	0.01	0.39 m	0.02	0.79 m	16 m
107	0.4 m	0.00	0.36 m	0.02	0.76 m	20 m
108	0.4 m	0.01	0.33 m	0.01	0.73 m	24 m
109	0.4 m	0.00	0.35 m	0.01	0.75 m	28 m
110	0.41 m	0.00	0.33 m	0.01	0.74 m	32 m
111	0.41 m	0.01	0.33 m	0.02	0.74 m	36 m
112	0.41 m	0.01	0.31 m	0.01	0.72 m	40 m
113	0.4 m	0.01	0.31 m	0.01	0.71 m	44 m
114	0.38 m	0.01	0.31 m	0.01	0.69 m	48 m
115	0.38 m	0.00	0.31 m	0.01	0.69 m	52 m
116	0.38 m	0.00	0.29 m	0.01	0.67 m	56 m
117	0.38 m	0.00	0.3 m	0.01	0.68 m	60 m
118	0.38 m	0.00	0.31 m	0.01	0.69 m	64 m
119	0.38 m	0.00	0.3 m	0.01	0.68 m	68 m
120	0.39 m	0.00	0.31 m	0.00	0.7 m	72 m
121	0.39 m	0.01	0.3 m	0.01	0.69 m	76 m
122	0.38 m	0.01	0.29 m	0.01	0.67 m	80 m
123	0.37 m	0.00	0.31 m	0.01	0.68 m	84 m
124	0.37 m	0.00	0.33 m	0.01	0.7 m	88 m

Tabela B2. 5 – Rooms 125 - 154

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
125	0.38 m	0.00	0.33 m	0.00	0.71 m	100 m
126	0.39 m	0.00	0.33 m	0.01	0.72 m	104 m
127	0.39 m	0.00	0.32 m	0.01	0.71 m	108 m
128	0.39 m	0.00	0.33 m	0.01	0.72 m	112 m
129	0.39 m	0.01	0.33 m	0.01	0.72 m	116 m
130	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	72 m
131	0.4 m	0.01	0.36 m	0.01	0.76 m	120 m
132	0.4 m	0.00	0.36 m	0.01	0.76 m	124 m
133	0.39 m	0.00	0.35 m	0.01	0.74 m	128 m
134	0.39 m	0.00	0.35 m	0.01	0.74 m	132 m
135	0.39 m	0.01	0.35 m	0.01	0.74 m	136 m
136	0.4 m	0.01	0.34 m	0.01	0.74 m	140 m
137	0.41 m	0.00	0.33 m	0.01	0.74 m	144 m
138	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	148 m
139	0.39 m	0.01	0.33 m	0.01	0.72 m	152 m
140	0.39 m	0.01	0.32 m	0.01	0.71 m	156 m
141	0.39 m	0.01	0.32 m	0.00	0.71 m	160 m
142	0.38 m	0.00	0.32 m	0.00	0.7 m	164 m
143	0.38 m	0.00	0.31 m	0.00	0.69 m	168 m
144	0.38 m	0.01	0.32 m	0.00	0.7 m	172 m
145	0.38 m	0.01	0.31 m	0.01	0.69 m	176 m
146	0.38 m	0.00	0.34 m	0.01	0.72 m	180 m
147	0.39 m	0.00	0.33 m	0.01	0.72 m	184 m
148	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	188 m
149	0.4 m	0.00	0.33 m	0.01	0.73 m	192 m
150	0.4 m	0.00	0.32 m	0.01	0.72 m	196 m
151	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	200 m
152	0.4 m	0.01	0.35 m	0.01	0.75 m	204 m
153	0.38 m	0.00	0.37 m	0.02	0.75 m	208 m
154	0.38 m	0.00	0.38 m	0.01	0.76 m	212 m

Tabela B2. 6 – Rooms 155 - 184

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
155	0.37 m	0.00	0.37 m	0.01	0.74 m	220 m
156	0.37 m	0.01	0.33 m	0.02	0.7 m	224 m
157	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	228 m
158	0.4 m	0.01	0.31 m	0.01	0.71 m	232 m
159	0.4 m	0.02	0.3 m	0.02	0.7 m	236 m
160	0.38 m	0.00	0.31 m	0.01	0.69 m	240 m
161	0.38 m	0.00	0.32 m	0.01	0.7 m	244 m
162	0.39 m	0.00	0.32 m	0.01	0.71 m	248 m
163	0.39 m	0.01	0.32 m	0.01	0.71 m	252 m
164	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	256 m
165	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	260 m
166	0.39 m	0.01	0.33 m	0.01	0.72 m	264 m
167	0.39 m	0.01	0.34 m	0.01	0.73 m	268 m
168	0.4 m	0.01	0.34 m	0.01	0.74 m	272 m
169	0.41 m	0.00	0.33 m	0.01	0.74 m	276 m
170	0.42 m	0.00	0.32 m	0.01	0.74 m	280 m
171	0.41 m	0.00	0.32 m	0.01	0.73 m	284 m
172	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	288 m
173	0.41 m	0.01	0.31 m	0.01	0.72 m	292 m
174	0.42 m	0.00	0.29 m	0.01	0.71 m	296 m
175	0.41 m	0.01	0.29 m	0.01	0.7 m	300 m
176	0.38 m	0.01	0.32 m	0.01	0.7 m	304 m
177	0.38 m	0.00	0.34 m	0.01	0.72 m	308 m
178	0.37 m	0.00	0.36 m	0.01	0.73 m	312 m
179	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	316 m
180	0.39 m	0.01	0.35 m	0.01	0.74 m	320 m
181	0.39 m	0.01	0.35 m	0.01	0.74 m	324 m
182	0.39 m	0.01	0.362 m	0.01	0.752 m	328 m
183	0.38 m	0.00	0.37 m	0.02	0.75 m	332 m
184	0.38 m	0.00	0.36 m	0.01	0.74 m	336 m

Tabela B2. 8 – Rooms 185 - 214

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
185	0.38 m	0.00	0.36 m	0.01	0.74 m	340 m
186	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	344 m
187	0.38 m	0.00	0.34 m	0.01	0.72 m	348 m
188	0.39 m	0.01	0.33 m	0.02	0.72 m	352 m
189	0.41 m	0.00	0.32 m	0.01	0.73 m	356 m
190	0.4 m	0.00	0.35 m	0.01	0.75 m	360 m
191	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	364 m
192	0.4 m	0.01	0.35 m	0.01	0.75 m	368 m
193	0.39 m	0.00	0.36 m	0.01	0.75 m	372 m
194	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	376 m
195	0.38 m	0.01	0.34 m	0.01	0.72 m	380 m
196	0.38 m	0.00	0.33 m	0.01	0.71 m	384 m
197	0.38 m	0.00	0.34 m	0.01	0.72 m	388 m
198	0.38 m	0.01	0.33 m	0.01	0.71 m	392 m
199	0.38 m	0.01	0.33 m	0.01	0.71 m	396 m
200	0.38 m	0.00	0.33 m	0.01	0.71 m	400 m
201	0 m	0	0.65 m	0.01	0.65 m	4 m
202	0.38 m	0.01	0.37 m	0.03	0.75 m	8 m
203	0.36 m	0.01	0.41 m	0.02	0.77 m	12 m
204	0.37 m	0.01	0.41 m	0.02	0.78 m	16 m
205	0.37 m	0.01	0.4 m	0.02	0.77 m	20 m
206	0.39 m	0.01	0.39 m	0.01	0.78 m	24 m
207	0.39 m	0.01	0.4 m	0.02	0.79 m	28 m
208	0.4 m	0.02	0.41 m	0.02	0.81 m	32 m
209	0.37 m	0.01	0.39 m	0.03	0.76 m	36 m
210	0.39 m	0.01	0.33 m	0.02	0.72 m	40 m
211	0.39 m	0.02	0.36 m	0.02	0.75 m	44 m
212	0.41 m	0.01	0.35 m	0.03	0.76 m	48 m
213	0.41 m	0.01	0.29 m	0.02	0.7 m	52 m
214	0.41 m	0.00	0.25 m	0.02	0.66 m	56 m

Tabela B2. 7 – Rooms 215 - 244

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
215	0.41 m	0.00	0.25 m	0.02	0.66 m	60 m
216	0.41 m	0.01	0.3 m	0.02	0.71 m	64 m
217	0.42 m	0.01	0.3 m	0.01	0.72 m	68 m
218	0.42 m	0.02	0.3 m	0.02	0.72 m	72 m
219	0.41 m	0.01	0.33 m	0.01	0.74 m	76 m
220	0.4 m	0.01	0.33 m	0.01	0.73 m	80 m
221	0.4 m	0.01	0.31 m	0.02	0.71 m	84 m
222	0.39 m	0.02	0.29 m	0.01	0.68 m	88 m
223	0.39 m	0.01	0.29 m	0.01	0.68 m	92 m
224	0.39 m	0.01	0.3 m	0.02	0.69 m	96 m
225	0.4 m	0.02	0.34 m	0.02	0.74 m	100 m
226	0.38 m	0.01	0.34 m	0.02	0.72 m	104 m
227	0.39 m	0.03	0.34 m	0.03	0.73 m	108 m
228	0.37 m	0.02	0.35 m	0.03	0.72 m	112 m
229	0.38 m	0.02	0.35 m	0.02	0.73 m	116 m
230	0.38 m	0.01	0.35 m	0.01	0.73 m	120 m
231	0.4 m	0.02	0.36 m	0.02	0.76 m	124 m
232	0.4 m	0.00	0.35 m	0.01	0.75 m	128 m
233	0.41 m	0.02	0.35 m	0.02	0.76 m	132 m
234	0.4 m	0.01	0.36 m	0.01	0.76 m	136 m
235	0.4 m	0.02	0.36 m	0.02	0.76 m	140 m
236	0.4 m	0.02	0.35 m	0.02	0.75 m	144 m
237	0.4 m	0.00	0.34 m	0.00	0.74 m	148 m
238	0.41 m	0.02	0.34 m	0.02	0.75 m	152 m
239	0.4 m	0.01	0.36 m	0.02	0.76 m	156 m
240	0.4 m	0.01	0.37 m	0.02	0.77 m	160 m
241	0.39 m	0.01	0.4 m	0.02	0.79 m	164 m
242	0.37 m	0.02	0.41 m	0.02	0.78 m	168 m
243	0.39 m	0.01	0.4 m	0.01	0.79 m	172 m
244	0.38 m	0.00	0.41 m	0.01	0.79 m	176 m

Tabela B2. 10 – Rooms 245 - 274

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
245	0.38 m	0.01	0.39 m	0.02	0.77 m	180 m
246	0.37 m	0.01	0.35 m	0.01	0.72 m	184 m
247	0.38 m	0.01	0.37 m	0.01	0.75 m	188 m
248	0.38 m	0.02	0.38 m	0.02	0.76 m	192 m
249	0.36 m	0.02	0.38 m	0.03	0.74 m	196 m
250	0.37 m	0.03	0.4 m	0.03	0.77 m	200 m
251	0.35 m	0.03	0.39 m	0.04	0.74 m	204 m
252	0.37 m	0.02	0.39 m	0.03	0.76 m	208 m
253	0.38 m	0.01	0.37 m	0.02	0.75 m	212 m
254	0.39 m	0.01	0.35 m	0.02	0.74 m	216 m
255	0.39 m	0.01	0.34 m	0.02	0.73 m	220 m
256	0.38 m	0.01	0.35 m	0.02	0.73 m	224 m
257	0.38 m	0.00	0.36 m	0.02	0.74 m	228 m
258	0.38 m	0.00	0.36 m	0.01	0.74 m	232 m
259	0.38 m	0.02	0.35 m	0.02	0.73 m	236 m
260	0.37 m	0.01	0.35 m	0.01	0.72 m	240 m
261	0.37 m	0.00	0.36 m	0.01	0.73 m	244 m
262	0.38 m	0.02	0.35 m	0.02	0.73 m	248 m
263	0.4 m	0.03	0.32 m	0.03	0.72 m	252 m
264	0.39 m	0.00	0.33 m	0.02	0.72 m	256 m
265	0.38 m	0.01	0.32 m	0.01	0.7 m	260 m
266	0.4 m	0.03	0.31 m	0.02	0.71 m	264 m
267	0.4 m	0.02	0.31 m	0.01	0.71 m	268 m
268	0.41 m	0.01	0.3 m	0.02	0.71 m	272 m
269	0.4 m	0.02	0.33 m	0.03	0.73 m	276 m
270	0.38 m	0.02	0.35 m	0.02	0.73 m	280 m
271	0.37 m	0.01	0.35 m	0.02	0.72 m	284 m
272	0.38 m	0.01	0.34 m	0.01	0.72 m	288 m
273	0.42 m	0.02	0.29 m	0.03	0.71 m	292 m
274	0.41 m	0.00	0.34 m	0.02	0.75 m	296 m

Tabela B2. 9 – Rooms 275 - 304

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
275	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	300 m
276	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	304 m
277	0.41 m	0.02	0.32 m	0.03	0.73 m	308 m
278	0.39 m	0.01	0.33 m	0.01	0.72 m	312 m
279	0.38 m	0.00	0.33 m	0.01	0.71 m	316 m
280	0.39 m	0.02	0.34 m	0.02	0.73 m	320 m
281	0.39 m	0.02	0.32 m	0.02	0.71 m	324 m
282	0.39 m	0.01	0.34 m	0.01	0.73 m	328 m
283	0.39 m	0.01	0.35 m	0.01	0.74 m	332 m
284	0.41 m	0.02	0.34 m	0.02	0.75 m	336 m
285	0.39 m	0.01	0.33 m	0.01	0.72 m	340 m
286	0.39 m	0.00	0.32 m	0.01	0.71 m	344 m
287	0.4 m	0.01	0.31 m	0.01	0.71 m	348 m
288	0.41 m	0.01	0.29 m	0.02	0.7 m	352 m
289	0.41 m	0.01	0.32 m	0.02	0.73 m	356 m
290	0.42 m	0.00	0.32 m	0.04	0.74 m	360 m
291	0.43 m	0.00	0.35 m	0.02	0.78 m	364 m
292	0.43 m	0.02	0.34 m	0.02	0.77 m	368 m
293	0.42 m	0.00	0.32 m	0.02	0.74 m	372 m
294	0.41 m	0.00	0.3 m	0.01	0.71 m	376 m
295	0.42 m	0.00	0.32 m	0.01	0.74 m	380 m
296	0.42 m	0.01	0.31 m	0.02	0.73 m	384 m
297	0.41 m	0.00	0.32 m	0.02	0.73 m	388 m
298	0.41 m	0.00	0.32 m	0.02	0.73 m	392 m
299	0.41 m	0.01	0.32 m	0.01	0.73 m	396 m
300	0.42 m	0.02	0.35 m	0.02	0.77 m	400 m
301	0.37 m	0.02	0 m	0	0.37 m	404 m
302	0.38 m	0.02	0.34 m	0.02	0.72 m	408 m
303	0.34 m	0.01	0.36 m	0.01	0.7 m	412 m
304	0.35 m	0.01	0.37 m	0.00	0.72 m	416 m

Tabela B2. 11 – Rooms 303 - 334

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
305	0.36 m	0.01	0.36 m	0.01	0.72 m	20 m
306	0.37 m	0.02	0.34 m	0.02	0.71 m	24 m
307	0.35 m	0.02	0.37 m	0.03	0.7 m	28 m
308	0.38 m	0.03	0.33 m	0.03	0.71 m	32 m
309	0.39 m	0.02	0.31 m	0.02	0.7 m	36 m
310	0.37 m	0.00	0.32 m	0.01	0.69 m	40 m
311	0.38 m	0.01	0.33 m	0.01	0.71 m	44 m
312	0.39 m	0.00	0.31 m	0.01	0.7 m	48 m
313	0.4 m	0.01	0.29 m	0.01	0.69 m	52 m
314	0.4 m	0.01	0.28 m	0.01	0.68 m	56 m
315	0.4 m	0.01	0.29 m	0.01	0.69 m	60 m
316	0.4 m	0.01	0.32 m	0.02	0.72 m	64 m
317	0.4 m	0.01	0.34 m	0.02	0.74 m	68 m
318	0.4 m	0.00	0.34 m	0.01	0.74 m	72 m
319	0.4 m	0.00	0.33 m	0.01	0.73 m	76 m
320	0.39 m	0.00	0.33 m	0.01	0.72 m	80 m
321	0.4 m	0.00	0.31 m	0.01	0.71 m	84 m
322	0.41 m	0.00	0.3 m	0.01	0.71 m	88 m
323	0.4 m	0.00	0.3 m	0.01	0.7 m	92 m
324	0.4 m	0.00	0.31 m	0.01	0.71 m	96 m
325	0.4 m	0.00	0.32 m	0.01	0.72 m	100 m
326	0.4 m	0.01	0.34 m	0.01	0.74 m	104 m
327	0.4 m	0.01	0.33 m	0.01	0.73 m	108 m
328	0.4 m	0.01	0.35 m	0.01	0.75 m	112 m
329	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	116 m
330	0.41 m	0.00	0.32 m	0.01	0.73 m	120 m
331	0.41 m	0.00	0.33 m	0.01	0.74 m	124 m
332	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	128 m
333	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	132 m
334	0.42 m	0.00	0.33 m	0.01	0.75 m	136 m

Tabela B2. 12 – Rooms 335 - 364

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
335	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	140 m
336	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	144 m
337	0.38 m	0.01	0.37 m	0.01	0.75 m	148 m
338	0.39 m	0.01	0.39 m	0.01	0.78 m	152 m
339	0.39 m	0.00	0.35 m	0.00	0.74 m	156 m
340	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	160 m
341	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	164 m
342	0.39 m	0.00	0.36 m	0.01	0.75 m	168 m
343	0.39 m	0.00	0.35 m	0.01	0.74 m	172 m
344	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	176 m
345	0.38 m	0.00	0.36 m	0.01	0.74 m	180 m
346	0.39 m	0.00	0.34 m	0.01	0.73 m	184 m
347	0.38 m	0.00	0.34 m	0.01	0.72 m	188 m
348	0.39 m	0.01	0.33 m	0.01	0.72 m	192 m
349	0.39 m	0.01	0.34 m	0.01	0.73 m	196 m
350	0.38 m	0.00	0.34 m	0.01	0.72 m	200 m
351	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	204 m
352	0.38 m	0.00	0.36 m	0.01	0.74 m	208 m
353	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	212 m
354	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	216 m
355	0.38 m	0.00	0.38 m	0.01	0.76 m	220 m
356	0.38 m	0.00	0.38 m	0.01	0.76 m	224 m
357	0.38 m	0.00	0.37 m	0.01	0.75 m	228 m
358	0.37 m	0.00	0.37 m	0.01	0.74 m	232 m
359	0.38 m	0.00	0.37 m	0.01	0.75 m	236 m
360	0.37 m	0.00	0.37 m	0.01	0.74 m	240 m
361	0.37 m	0.00	0.35 m	0.02	0.72 m	244 m
362	0.38 m	0.01	0.35 m	0.01	0.73 m	248 m
363	0.38 m	0.00	0.34 m	0.01	0.72 m	252 m
364	0.38 m	0.00	0.36 m	0.01	0.74 m	256 m

Tabela B2. 14 – Rooms 425 - 354

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
365	0.37 m	0.00	0.36 m	0.01	0.73 m	280 m
366	0.38 m	0.00	0.35 m	0.01	0.73 m	284 m
367	0.38 m	0.00	0.34 m	0.01	0.72 m	288 m
368	0.4 m	0.01	0.34 m	0.01	0.74 m	272 m
369	0.39 m	0.02	0.33 m	0.02	0.72 m	276 m
370	0.38 m	0.00	0.38 m	0.01	0.76 m	280 m
371	0.38 m	0.00	0 m	0	0.38 m	284 m
372	0.37 m	0.00	0.34 m	0.00	0.71 m	288 m
373	0.37 m	0.00	0.34 m	0.01	0.71 m	292 m
374	0.38 m	0.00	0.32 m	0.01	0.7 m	296 m
375	0.38 m	0.00	0.32 m	0.00	0.7 m	300 m
376	0.39 m	0.00	0.32 m	0.00	0.71 m	304 m
377	0.39 m	0.01	0.32 m	0.01	0.71 m	308 m
378	0.38 m	0.00	0.32 m	0.01	0.7 m	312 m
379	0.38 m	0.01	0.32 m	0.01	0.7 m	316 m
380	0.37 m	0.00	0.33 m	0.00	0.7 m	320 m
381	0.37 m	0.00	0.34 m	0.01	0.71 m	324 m
382	0.37 m	0.00	0.35 m	0.01	0.72 m	328 m
383	0.38 m	0.00	0.33 m	0.01	0.71 m	332 m
384	0.38 m	0.01	0.32 m	0.01	0.7 m	336 m
385	0.4 m	0.01	0.29 m	0.01	0.69 m	340 m
386	0.39 m	0.01	0.31 m	0.01	0.7 m	344 m
387	0.38 m	0.01	0.32 m	0.01	0.7 m	348 m
388	0.39 m	0.01	0.33 m	0.01	0.72 m	352 m
389	0.39 m	0.01	0.33 m	0.01	0.72 m	356 m
390	0.39 m	0.01	0.33 m	0.01	0.72 m	360 m
391	0.39 m	0.01	0.33 m	0.01	0.72 m	364 m
392	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	368 m
393	0.39 m	0.00	0.31 m	0.01	0.7 m	372 m
394	0.39 m	0.01	0.31 m	0.01	0.7 m	376 m

Tabela B2. 13 – Rooms 455 - 484

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
395	0.4 m	0.01	0.31 m	0.01	0.71 m	380 m
396	0.41 m	0.00	0.3 m	0.01	0.71 m	384 m
397	0.41 m	0.00	0.31 m	0.01	0.72 m	388 m
398	4100 m	0.01	0.33 m	0.01	4100.33 m	392 m
399	0.4 m	0.01	0.35 m	0.01	0.75 m	396 m
400	0.38 m	0.00	0.36 m	0.01	0.74 m	400 m
401	0.39 m	0.01	0 m	0	0.39 m	4 m
402	0.4 m	0.02	0 m	0	0.4 m	8 m
403	0.37 m	0.01	0.34 m	0.01	0.71 m	4 m
404	0.37 m	0.01	0.35 m	0.01	0.72 m	8 m
405	0.36 m	0.01	0.34 m	0.02	0.7 m	12 m
406	0.37 m	0.00	0.32 m	0.01	0.69 m	16 m
407	0.38 m	0.00	0.31 m	0.00	0.69 m	20 m
408	0.39 m	0.01	0.32 m	0.01	0.71 m	24 m
409	0.42 m	0.01	0.29 m	0.01	0.71 m	28 m
410	0.42 m	0.00	0.29 m	0.01	0.71 m	32 m
411	0.43 m	0.01	0.27 m	0.01	0.7 m	36 m
412	0.42 m	0.00	0.29 m	0.01	0.71 m	40 m
413	0.41 m	0.01	0.29 m	0.02	0.7 m	44 m
414	0.41 m	0.00	0.33 m	0.01	0.74 m	48 m
415	0.41 m	0.01	0.32 m	0.01	0.73 m	52 m
416	0.39 m	0.00	0.3 m	0.01	0.69 m	56 m
417	0.39 m	0.01	0.29 m	0.01	0.68 m	60 m
418	0.4 m	0.00	0.3 m	0.01	0.7 m	64 m
419	0.39 m	0.00	0.3 m	0.01	0.69 m	68 m
420	0.39 m	0.00	0.02 m	0.01	0.41 m	72 m
421	0.39 m	0.00	0.29 m	0.01	0.68 m	76 m
422	0.39 m	0.01	0.28 m	0.00	0.67 m	80 m
423	0.4 m	0.01	0.29 m	0.01	0.69 m	84 m
424	0.41 m	0.00	0.31 m	0.01	0.72 m	88 m
						92 m
						96 m

Tabela B2. 16 – Rooms 425 - 454

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
425	0.4 m	0.01	0.33 m	0.01	0.73 m	100 m
426	0.39 m	0.02	0.35 m	0.02	0.74 m	104 m
427	0.42 m	0.03	0.32 m	0.03	0.74 m	108 m
428	0.4 m	0.01	0.34 m	0.01	0.74 m	112 m
429	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	116 m
430	0.4 m	0.02	0.33 m	0.03	0.73 m	120 m
431	0.39 m	0.01	0.31 m	0.01	0.7 m	124 m
432	0.41 m	0.00	0.29 m	0.01	0.69 m	128 m
433	0.41 m	0.00	0.28 m	0.01	0.68 m	132 m
434	0.4 m	0.01	0.28 m	0.01	0.68 m	136 m
435	0.41 m	0.00	0.29 m	0.01	0.7 m	140 m
436	0.41 m	0.00	0.32 m	0.01	0.73 m	144 m
437	0.41 m	0.00	0.36 m	0.01	0.77 m	148 m
438	0.4 m	0.01	0.37 m	0.01	0.77 m	152 m
439	0.4 m	0.00	0.36 m	0.01	0.76 m	156 m
440	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	160 m
441	0.41 m	0.00	0.34 m	0.00	0.75 m	164 m
442	0.39 m	0.01	0.34 m	0.01	0.73 m	168 m
443	0.39 m	0.00	0.36 m	0.01	0.75 m	172 m
444	0.4 m	0.00	0.35 m	0.01	0.75 m	176 m
445	0.39 m	0.00	0.34 m	0.01	0.73 m	180 m
446	0.4 m	0.00	0.32 m	0.01	0.72 m	184 m
447	0.4 m	0.00	0.31 m	0.01	0.71 m	188 m
448	0.39 m	0.00	0.32 m	0.01	0.71 m	192 m
449	0.39 m	0.00	0.32 m	0.01	0.71 m	196 m
450	0.38 m	0.00	0.34 m	0.01	0.72 m	200 m
451	0.39 m	0.01	0.34 m	0.01	0.73 m	204 m
452	0.4 m	0.01	0.35 m	0.01	0.75 m	208 m
453	0.4 m	0.01	0.36 m	0.01	0.76 m	212 m
454	0.39 m	0.01	0.36 m	0.02	0.75 m	216 m

Tabela B2. 15 – Rooms 455 - 484

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
455	0.39 m	0.01	0.35 m	0.02	0.74 m	220 m
456	0.38 m	0.00	0.34 m	0.01	0.72 m	224 m
457	0.39 m	0.02	0.33 m	0.02	0.72 m	228 m
458	0.38 m	0.01	0.35 m	0.01	0.73 m	232 m
459	0.39 m	0.01	0.36 m	0.02	0.75 m	236 m
460	0.4 m	0.00	0.35 m	0.01	0.75 m	240 m
461	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	244 m
462	0.41 m	0.00	0.33 m	0.01	0.74 m	248 m
463	0.41 m	0.00	0.33 m	0.01	0.74 m	252 m
464	0.4 m	0.01	0.34 m	0.01	0.74 m	256 m
465	0.4 m	0.01	0.33 m	0.01	0.73 m	260 m
466	0.39 m	0.01	0.32 m	0.01	0.71 m	264 m
467	0.4 m	0.01	0.32 m	0.01	0.72 m	268 m
468	0.42 m	0.00	0.32 m	0.01	0.74 m	272 m
469	0.41 m	0.00	0.34 m	0.01	0.75 m	276 m
470	0.4 m	0.01	0.33 m	0.01	0.73 m	280 m
471	0.41 m	0.01	0.32 m	0.01	0.73 m	284 m
472	0.42 m	0.00	0.3 m	0.01	0.72 m	288 m
473	0.41 m	0.00	0.29 m	0.01	0.7 m	292 m
474	0.41 m	0.00	0.29 m	0.01	0.7 m	296 m
475	0.42 m	0.00	0.29 m	0.01	0.71 m	300 m
476	0.39 m	0.01	0.3 m	0.02	0.69 m	304 m
477	0.4 m	0.01	0.3 m	0.01	0.7 m	308 m
478	0.41 m	0.00	0.29 m	0.01	0.7 m	312 m
479	0.41 m	0.01	0.29 m	0.01	0.7 m	316 m
480	0.42 m	0.00	0.29 m	0.01	0.71 m	320 m
481	0.4 m	0.00	0.29 m	0.01	0.69 m	324 m
482	0.4 m	0.01	0.31 m	0.03	0.71 m	328 m
483	0.41 m	0.00	0.3 m	0.03	0.71 m	332 m
484	0.41 m	0.01	0.33 m	0.01	0.74 m	336 m

Tabela B2. 17 – Rooms 485 - 500

A	B	C	D	E	F	G
Rooms	Espessura1	Desvio Padrão1	Espessura2	Desvio Padrão2	Espessura Total	Comp. Total
485	0.41 m	0.00	0.31 m	0.01	0.72 m	340 m
486	0.39 m	0.02	0.31 m	0.02	0.7 m	368 m
487	0.39 m	0.02	0.31 m	0.03	0.7 m	344 m
488	0.4 m	0.01	0.3 m	0.01	0.7 m	348 m
489	0.4 m	0.01	0.3 m	0.01	0.7 m	352 m
490	0.41 m	0.01	0.3 m	0.01	0.71 m	356 m
491	0.4 m	0.01	0.31 m	0.01	0.71 m	360 m
492	0.4 m	0.00	0.32 m	0.01	0.72 m	364 m
493	0.41 m	0.00	0.32 m	0.01	0.73 m	368 m
494	0.41 m	0.01	0.3 m	0.01	0.71 m	372 m
495	0.42 m	0.00	0.29 m	0.01	0.71 m	376 m
496	0.41 m	0.01	0.31 m	0.01	0.72 m	380 m
497	0.41 m	0.00	0.33 m	0.01	0.74 m	384 m
498	0.41 m	0.00	0.32 m	0.00	0.73 m	388 m
499	0.42 m	0.00	0.3 m	0.01	0.72 m	392 m
500	0.4 m	0.01	0.3 m	0.01	0.7 m	396 m





2022

ERMES VERA CRUZ

AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS COM RADAR DE PROSPECÇÃO

