

ASPETOS GEOTÉCNICOS DA CONCEÇÃO E CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS

ANA MARGARIDA AMORIM DE ARAÚJO NOVO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Eduardo Manuel Cabrita Fortunato

Coorientador: Engenheiro Pedro Manuel Moreira de Carvalho Amorim
Neto

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais, Cristina e Carlos

Tenho em mim todos os sonhos do mundo.

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não teria sido possível sem a colaboração e incentivo de várias instituições e pessoas, às quais dedico os meus sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador, Professor Doutor Eduardo Manuel Cabrita Fortunato, pela partilha de conhecimentos e orientação disponibilizada.

Ao Engenheiro Pedro Manuel Moreira de Carvalho Amorim Neto, meu co-orientador, pela oportunidade que me deu em descobrir um pouco mais da realidade do mundo do trabalho na engenharia, na empresa AdFGeo, por toda a partilha de conhecimento, pela compreensão e disponibilidade sempre presentes.

À AdF, empresa que me acolheu de braços abertos e cujos colaboradores me receberam com simpatia e ajudaram a integrar num novo ambiente, em particular, à Engenheira Patrícia Brandão e ao Engenheiro Luís Branco pela preocupação demonstrada em integrar-me no núcleo da empresa, por partilharem comigo as suas experiências e conhecimento.

À MIDAS IT que disponibilizou o software utilizado na presente dissertação e aos seus colaboradores que me prestaram suporte técnico quando foi necessário.

Aos docentes da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto que de alguma forma ajudaram partilhando os seus conhecimentos e mostrando-se disponíveis sempre que possível.

À Dra. Bianca Varandas por toda a força e incentivo que me deu, por nunca ter deixado de acreditar em mim e me ter ajudado a ultrapassar momentos mais difíceis ao longo desta fase de trabalho.

À minha grande amiga Joana Fernandes pela amizade incondicional, pelo apoio constante, pela compreensão, paciência e força dadas ao longo de todo este percurso que foi partilhado com tantos momentos que irei para sempre recordar com carinho. Aos meus amigos Ivo Gonçalves, Tiago Carvalho, David Rocha, Diogo Lourenço, Jorge Santos, Celestino Alves e Daniel Pontes pelo apoio e amizade que sempre demonstraram. Estando uns mais distantes que outros, todos foram o meu suporte e me deram força para conseguir terminar esta etapa. Um especial obrigada a cada um deles.

Aos meus irmãos, tios e primas que acreditaram em mim, que estiveram sempre presentes em todos os momentos, em especial, nos mais difíceis, e me apoiaram e incentivaram sempre ao longo deste percurso.

Por fim, aos meus pais, Cristina e Carlos:

À minha mãe por me ter dado alegria e força sempre, por estar ao meu lado em todos os momentos, por ser incansável e por ter percorrido este caminho comigo, durante as caminhadas mais planas e aquelas mais íngremes, obrigada por nunca teres largado a minha mão.

Ao meu pai pela persistência, pelo apoio dado, diariamente, por ter lutado comigo ao longo deste percurso sem nunca deixar de acreditar em mim, sem nunca baixar os braços, sem nunca deixar que uma barreira de mais de 6 000 km de distância o impedisse de estar presente sempre. Obrigada por teres partilhado comigo todo o teu conhecimento, por sacrificares a tua vida para que eu possa estar hoje, aqui, a terminar um curso superior, e por todo o amor que não há distância que separe.

Obrigada aos dois por me terem proporcionado as condições necessárias para eu ter chegado até aqui e por tudo aquilo que me têm dado ao longo de toda a minha vida que faz de mim o que sou hoje.

RESUMO

O adequado desempenho dos pavimentos industriais, relacionado com a sua capacidade de carga e com a regularidade geométrica da sua superfície, é um dos aspetos mais relevantes para que se possam movimentar cargas com equipamentos mecânicos e para que as mercadorias possam ser armazenadas de forma segura e ocupando o mínimo espaço possível. Assim, tem havido uma preocupação crescente no âmbito da conceção, construção e manutenção de pavimentos industriais.

A presente dissertação tem como objetivo analisar alguns aspetos relativos a esses processos, em particular os que se relacionam com a funcionalidade e a estabilidade dessas estruturas.

Procede-se à análise de um manual técnico que enquadra a conceção e construção de pavimentos industriais, sendo destacados alguns requisitos que esse documento estabelece no sentido de garantir o bom desempenho deste tipo de pavimentos.

Recorre-se a um modelo numérico tridimensional de análise estrutural e a um conjunto de elementos de base relativos a um projeto de um pavimento, para proceder à verificação dos requisitos de funcionalidade e de estabilidade da solução proposta.

Depois dessa verificação, é realizado um estudo paramétrico, fazendo variar a espessura dos elementos do pavimento, com o objetivo de comparar os resultados entre si e de avaliar os custos associados a cada uma das soluções analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: pavimentos industriais, requisitos de funcionalidade, requisitos estruturais.

ABSTRACT

A proper performance of concrete industrial ground floors, is related to the load capacity and the geometric regularity of its surface. It is one of its most relevant aspects in order to be able to move loads using mechanical equipment and allowing goods to be stored safely and occupying the minimum possible space. Thus, there has been a growing concern in the design, construction and maintenance of concrete industrial ground floors.

This thesis aims to analyze some aspects related to those proceedings, particularly the ones concerning the functionality and stability of those structures.

It is performed the analysis of a technical manual that covers the design and construction of concrete industrial ground floors, highlighting some requirements that the document establishes to ensure the good performance of this type of flooring.

Over a three-dimensional numerical model of structural analysis and a set of base elements obtained from a previously designed ground pavement, it is to carried out the verification of the requirements, that is, the functionality and stability of the proposed solution.

Afterwards this verification, a parametric study is performed, involving the changing of the thickness of the floor layers in order to compare the results among them and to assess the costs associated with each analyzed solution.

Keywords: industrial floors, functionality requirements, structural requirements.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVO	1
1.3. ESTRUTURA	1
2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. CARACTERIZAÇÃO DE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS	4
2.2.1. EVOLUÇÃO DO SETOR INDUSTRIAL	4
2.2.2. TIPOS E CARACTERIZAÇÃO DE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS	5
2.2.3. CONSTITUIÇÃO DE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS CORRENTES	7
2.2.3.1. Laje de Betão	8
2.2.3.2. Membrana de separação	8
2.2.3.3. Base e Sub-base	9
2.2.3.4. Solo de Fundação	9
2.3. PROSPEÇÃO GEOTÉCNICA PARA CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS	9
2.3.1. SONDAGENS	10
2.3.2. ENSAIOS IN SITU	11
2.3.2.1. Ensaio SPT (Standard Penetration Test)	12
2.3.2.2. Ensaio CPT (Cone-penetration test)	13
2.3.2.3. Ensaio DPSH (Dynamic Probing Super Heavy)	14
2.3.2.4. Ensaio PLT (Plate Load Test)	15
2.3.2.5. Ensaio FWD (Falling Weight Deflectometer)	17
2.4. TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE SOLOS	18
2.4.1. TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE SOLOS EM PROFUNDIDADE	18
2.4.1.1. Colunas de Brita	18

2.4.1.2. Geodrenos Verticais.....	20
2.4.2. TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE SOLOS À SUPERFÍCIE COM GEOSSINTÉTICOS.....	20
2.4.2.1. Aspectos gerais.....	20
2.4.2.2. Geogrelhas.....	21

3. REQUISITOS DE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS.....23

3.1. ASPETOS GERAIS.....	23
3.2. REQUISITOS OPERACIONAIS.....	24
3.3. REQUISITOS ESTRUTURAIS.....	26
3.4. REQUISITOS DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO.....	27
3.4.1. PLANIMETRIA E NIVELAMENTO.....	27
3.4.1.2. Áreas de movimento livre e áreas de movimento definido.....	28
3.4.2. RESISTÊNCIA À ABRASÃO.....	33
3.5. OUTROS REQUISITOS – PROSPEÇÃO GEOTÉCNICA.....	33

4. CASO DE ESTUDO.....35

4.1. INTRODUÇÃO.....	35
4.2. PROGRAMA MIDAS GTS NX.....	35
4.3. GEOMETRIA DOS TERRENOS DE FUNDAÇÃO E DAS CAMADAS DE PAVIMENTO.....	36
4.4. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	38
4.5. SOLICITAÇÕES NO PAVIMENTO.....	39
4.6. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.....	42

5. ANÁLISE DE RESULTADOS.....43

5.1. INTRODUÇÃO.....	43
5.2. ANÁLISE DE RESULTADOS PARA O PAVIMENTO PROPOSTO NO PROJETO.....	45
5.2.1. ANÁLISE DE CARGA DISTRIBUÍDA.....	45
5.2.2. ANÁLISE DE CARGAS CONCENTRADAS – CARREGAMENTO TOTAL.....	47
5.2.3. ANÁLISE DE CARGAS CONCENTRADAS – CARREGAMENTO ALTERNADO.....	51
5.2.4. ANÁLISE DE CARGAS ROLANTES.....	52
5.3. ESTUDO PARAMÉTRICO RELATIVO À ESTRUTURA DO PAVIMENTO.....	54
5.3.1. VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA LAJE.....	54
5.3.1.1. Análise de cargas concentradas – carregamento total.....	54

5.3.1.2. Análise de cargas concentradas – carregamento alternado.....	57
5.3.1.3. Análise de cargas rolantes	60
5.3.2. VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE AGREGADO BRITADO DE GRANULOMETRIA EXTENSA (ABGE).....	61
5.3.2.1. Análise de cargas concentradas – carregamento total	61
5.3.2.2. Análise de cargas concentradas – carregamento alternado.....	63
5.3.2.3. Análise de cargas rolantes	66
5.4. ANÁLISE DOS CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DAS DIVERSAS SOLUÇÕES DE PAVIMENTO.....	67
 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	 69
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de uma área de armazenamento/logística (adaptado de http://www.ssi-schaefer.com.br/armazenagem/porta-paleta.html)	7
Figura 2 - Estrutura de pavimentos industriais (adaptado de ACI Committee 360, 2010)	8
Figura 3 - Sondagem à percussão: a) esquema geral do ensaio; b) equipamentos; c) limpadeira. (Matos Fernandes, 2011)	11
Figura 4 - Amostrador normalizado de Terzaghi (Matos Fernandes, 2011)	12
Figura 5 - Esquema da ponteira do CPT (Matos Fernandes, 2011)	14
Figura 6 - Equipamento de execução do ensaio DPSH (adaptado de http://geocastum.it/indagini_geotecniche.php)	15
Figura 7 - Esquema simplificado do ensaio PLT (Matos Fernandes, 2011)	16
Figura 8 – Esquema tipo de registo de resultados de um ensaio PLT segundo a norma francesa NF-P94-117-1 (AFNOR, 2000)	17
Figura 9 - Esquema do Equipamento do ensaio FWD (Fortunato, 2016)	17
Figura 10 - Esquema de uma coluna de brita (Domingues, 2006)	18
Figura 11 - Método de instalação de colunas de brita em meio húmido e seco (Viana da Fonseca, 2014)	19
Figura 12 - Distribuição em planta de colunas de brita (Assunção, 2010)	19
Figura 13 - Caminho da água em ausência e presença de drenos verticais (Adaptado de Sousa, 2011)	20
Figura 14 - Efeito de confinamento gerado por geogrelhas (adaptado de http://www.globalturfconsult.com/pdf/SS_Biaxial_Geogrids.pdf)	22
Figura 15 - Empilhadores tipo: a) frontal; b) retrátil; c) VNA (adaptado de http://www.toyota-forklifts.com.pt)	25
Figura 16 - Inclinação do equipamento devido a desnivelamento (adaptado de Concrete Society, 2014)	26
Figura 17 – Esquema elucidativo do Nivelamento e da Planimetria (adaptado de Concrete Society, 2014)	28
Figura 18 - Áreas de movimento livre (FM) (adaptado de http://www.trovan.com/Applications/warehousing.html)	28
Figura 19 - Áreas de movimento definido (DM) (adaptado de http://www.wapshanghai.com/index.php?_m=mod_product&_a=view&p_id=174)	29
Figura 20 – Verificação da propriedade E, grelha de 3 metros (Concrete Society, 2014).	29
Figura 21 - Exemplos de cálculo da propriedade F (Concrete Society, 2014)	30
Figura 22 - Propriedades Z, X, dX e dZ (adaptado de Concrete Society, 2014)	32
Figura 23 - Determinação de d2Z. (adaptado de Concrete Society, 2014)	32

Figura 24 - Determinação de d_{2X} . (adaptado de Concrete Society, 2014).....	32
Figura 25 - Representação bidimensional da geometria do terreno e pavimento	38
Figura 26 - Disposição das estantes na área de armazenamento	40
Figura 27 - Disposição das estantes no modelo de cálculo.....	41
Figura 28 - Dimensões dos empilhadores (IPQ, 2009).....	41
Figura 29 - Representação tridimensional das condições fronteira (5508 nós, 4576 elementos).....	42
Figura 30 - Esquema representativo do carregamento alternado de estantes.....	43
Figura 31 - Esquema representativo do carregamento alternado e respetivas cargas	44
Figura 32 - Representação tridimensional de deslocamentos verticais devido ao carregamento de 40kN/m^2	45
Figura 33 - Representação de deslocamentos verticais num alinhamento devido ao carregamento de 40kN/m^2	46
Figura 34 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação de carga distribuída.....	46
Figura 35 - Configuração de cargas concentradas no modelo	47
Figura 36 - Gráfico de deslocamentos verticais ao longo do alinhamento central ($y=15,4$), com carregamento total	48
Figura 37 – Alinhamentos e grelha de análise da propriedade E.....	49
Figura 38 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento total das estantes	50
Figura 39 - Gráfico de assentamentos verticais ao longo do alinhamento central ($y=15,4$), com carregamento alternado	51
Figura 40 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento alternado das estantes.....	52
Figura 41 - Representação tridimensional dos deslocamentos verticais devido à carga rolante.....	53
Figura 42 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação da carga rolante.....	54
Figura 43 - Influência da espessura da laje nas propriedades geométricas do pavimento (carregamento total): a) propriedade E; b) propriedade F	56
Figura 44 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento total das estantes, laje com espessura $0,15\text{ m}$	57
Figura 45 - Influência da espessura da laje nas propriedades geométricas do pavimento (carregamento alternado): a) propriedade E; b) propriedade F	59
Figura 46 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento alternado das estantes, laje com espessura $0,15\text{ m}$	59
Figura 47 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação de cargas rolantes, laje com espessura $0,15\text{ m}$	61

Figura 48 – Influência da espessura da camada de ABGE nas propriedades geométricas do pavimento (carregamento total): a) propriedade E; b) propriedade F.....	63
Figura 49 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento total das estantes e ABGE com espessura 0,20 m	63
Figura 50 - Influência da espessura da camada de ABGE nas propriedades geométricas do pavimento (carregamento alternado): a) propriedade E; b) propriedade F	65
Figura 51 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento alternado das estantes e ABGE com espessura 0,20 m	65
Figura 52 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação de cargas rolantes e ABGE com espessura 0,20 m	66
Figura 53 – Variação do custo de construção do pavimento com a variação da espessura da laje	68
Figura 54 - Variação do custo de construção do pavimento com a variação da espessura da camada de ABGE.....	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de pavimentos quanto à utilização, segundo ANAPRE (adaptado de Cristelli, 2010)	6
Tabela 2 - Classificação de maciços terrosos quanto à compacidade (adaptado de Matos Fernandes, 2011)	13
Tabela 3 – Classes de pavimentos de áreas de movimento livre e valores dos percentis 95 permitidos para as propriedades E e F (adaptado de Concrete Society, 2014).....	31
Tabela 4- Classes de pavimento em áreas de movimento definido e limites permitidos para as propriedades dZ, dX, d2Z e d2X (adaptado de Concrete Society, 2014).....	33
Tabela 5 - Intervalo de cotas e espessura dos horizontes do maciço de fundação	37
Tabela 6 - Parâmetros geotécnicos	39
Tabela 7 - Propriedades do betão C25/30 utilizadas na modelação numérica	39
Tabela 8 - Tipos e magnitude das sobrecargas	40
Tabela 9 - Tensões totais	47
Tabela 10 - Valores obtidos para a propriedade E e F para o carregamento total das estantes	50
Tabela 11 - Valores obtidos para a propriedade E e F para o carregamento alternado	51
Tabela 12 - Valores obtidos para a propriedade E e F para o carregamento de cargas rolantes.....	53
Tabela 13 - Propriedades E e F para o caso de carregamento total e laje com espessura 0,17 m.....	55
Tabela 14 - Propriedades E e F para o caso de carregamento total e laje com espessura 0,16 m.....	55
Tabela 15 - Propriedades E e F para o caso de carregamento total e laje com espessura 0,15 m.....	56
Tabela 16 - Propriedades E e F para o caso de carregamento alternado e laje com espessura 0,17 m.....	57
Tabela 17 - Propriedades E e F para o caso de carregamento alternado e laje com espessura 0,16 m.....	58
Tabela 18 - Propriedades E e F para o caso de carregamento alternado e laje com espessura 0,15 m.....	58
Tabela 19 - Propriedades E e F para o caso de cargas rolantes e laje com espessura 0,17 m	60
Tabela 20 - Propriedades E e F para o caso de cargas rolantes e laje com espessura 0,16 m	60
Tabela 21 - Propriedades E e F para o caso de cargas rolantes e laje com espessura 0,15 m	60
Tabela 22 - Propriedades E e F para o caso de carregamento total e ABGE com espessura 0,30 m	62
Tabela 23 - Propriedades E e F para o caso de carregamento total e ABGE com espessura 0,20 m	62
Tabela 24 - Propriedades E e F para o caso de carregamento alternado e ABGE com espessura 0,30 m.....	64
Tabela 25 - Propriedades E e F para o caso de carregamento alternado e ABGE com espessura 0,20 m.....	64
Tabela 26 - Propriedades E e F para o caso de cargas rolantes e ABGE com espessura 0,30 m.....	66
Tabela 27 - Propriedades E e F para o caso de cargas rolantes e ABGE com espessura 0,20 m.....	66

Tabela 28 – Preços médios por metro cúbico de construção das camadas da estrutura de pavimento	67
Tabela 29 - Custo de construção do pavimento em função da variação da espessura da laje	67
Tabela 30 - Custo de construção do pavimento em função da variação de espessura da camada de ABGE.....	67

SIMBOLOGIA

b – diâmetro da placa no ensaio SPT;

c ; c' – coesão; coesão em tensões efetivas

C_E – coeficiente corretivo do resultado do ensaio SPT tendo em conta a energia;

C_D – coeficiente corretivo do resultado do ensaio SPT tendo em conta o diâmetro do furo de sondagem;

C_N – coeficiente corretivo do resultado do ensaio SPT tendo em conta a tensão efetiva vertical;

C_R – coeficiente corretivo do resultado do ensaio SPT tendo em conta o comprimento do trem de varas;

dZ , dX - diferença de elevação, em milímetros, entre os centros das rodas dianteiras e a diferença de elevação, em milímetros, dos centros dos eixos dianteiro e traseiro;

d^2Z , d^2X - variação em dZ e dX , respetivamente, em milímetros, ao longo de um movimento de 300 mm;

E – módulo de elasticidade;

E_v - módulo de deformabilidade determinado a partir do ensaio PLT;

E_{v1} , E_{v2} – módulo de deformabilidade no 1º e 2º ciclos de carregamento no ensaio PLT;

f_s – resistência lateral do ensaio CPT;

I_D – índice de compactidade

k - módulo de reação na camada de base através do ensaio PLT;

N – número de pancadas para cravar 30 cm o amostrador na 2ª fase do ensaio SPT;

$(N_1)_{60}$ – Valor do resultado do ensaio SPT corrigido para um ratio de energia de 60% e para uma tensão efetiva vertical de 1 atmosfera;

q_c – resistência de ponta ou do cone do ensaio CPT;

s – variação de assentamentos registada no ensaio PLT;

X - distância entre o centro dos eixos dianteiro e traseiro dos equipamentos rolantes, em metros;

Z – distância entre os pontos centrais das rodas dianteiras dos equipamentos, em metros;

Z_{SLOPE} - inclinação transversal do corredor entre os respetivos centros das rodas dianteiras do equipamento, em milímetros por metro.

SIMBOLOGIA GREGA

γ – peso volúmico;

Δq_s – variação de pressão de contacto aplicada no ensaio PLT;

ϕ ou ϕ' – ângulo de atrito em tensões totais e em tensões efetivas;

σ_f – componente normal da tensão de rotura;

τ_f – componente tangencial da tensão de rotura.

SIGLAS

ABGE – Agregado britado de granulometria extensa;

AFNOR - Association Française de Normalisation;

ANAPRE – Associação Nacional de Pisos de Revestimento de Alto Rendimento;

BS – British Standard;

BSI – British Standard Institution;

CPT – Cone Penetration Test;

CPTU – Piezocone Penetration Test;

DM – Defined-movement areas;

DP – Dynamic Probing test;

DPSH – Dynamic Probing Super Heavy;

EN – Norma Europeia;

FM – Free-movement áreas;

FWD – Falling Weight Deflectometer;

ISO – International Standard Organization;

NF – Norme Francaise;

PLT – Plate Load Test;

PVC – Policloreto de Polivinila

S.A. – Sociedade Anónima;

SPT – Standard Penetration Test;

TR34 – Technical Report 34;

VNA – Very Narrow Aisles.

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A produtividade da indústria e do setor da logística depende, entre outros fatores, dos equipamentos e das instalações que são utilizados. Nos últimos anos tem-se verificado um investimento significativo em projetos de unidades industriais, em particular de edifícios de armazém.

Um dos aspetos mais relevantes para o adequado funcionamento destas estruturas é o desempenho dos seus pavimentos. De facto, para que se possam movimentar cargas com equipamentos mecânicos e para que as mercadorias possam ser armazenadas de forma segura e ocupando o mínimo espaço possível, é necessário que os pavimentos exibam adequada capacidade de carga e superfícies com geometria regular e sem inclinações excessivas.

O estabelecimento dos requisitos estruturais e funcionais que permitem atingir estes objetivos está relacionado com as solicitações que se impõem a essas estruturas, com o tipo de organização do espaço e com os equipamentos utilizados.

A prática corrente tem permitido criar padrões relativamente a esses aspetos, os quais auxiliam no estabelecimento dos requisitos.

Assim, julgou-se oportuno avaliar a conceção estrutural de um pavimento industrial face a requisitos de funcionalidade estabelecidos num manual técnico e face às características mecânicas dos solos da respetiva fundação.

1.2. OBJETIVO

A presente dissertação tem como objetivo analisar alguns aspetos relativos à conceção e construção de pavimentos industriais, em particular os que se relacionam com a funcionalidade e a estabilidade dessas estruturas. Para tal, recorre-se a elementos relativos a um projeto de um pavimento, os quais foram disponibilizados no âmbito da colaboração estabelecida entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a empresa AdFGeo - Consultores de Geotecnia, Lda.

1.3. ESTRUTURA

O presente trabalho é constituído por 6 capítulos, sendo este o primeiro, correspondente à Introdução.

O capítulo 2, Considerações Gerais sobre Pavimentos Industriais, aborda a evolução do setor da construção de unidades industriais, apresenta uma breve caracterização de pavimentos industriais e refere a

constituição corrente deste tipo de pavimentos. Além disso, também são referidas questões relacionadas com a fase de prospeção geotécnica necessária para desenvolvimento do projeto, na qual são realizados diversos ensaios. Por fim, é feita uma breve apresentação das técnicas de melhoramento de solos que podem ser utilizadas para melhorar as condições de fundação deste tipo de estruturas.

No capítulo 3, Requisitos de Pavimentos Industriais, procede-se à análise de um manual técnico que enquadra a conceção e construção de pavimentos industriais, sendo destacados alguns requisitos que esse documento estabelece no sentido de garantir o bom desempenho deste tipo de pavimentos.

O capítulo 4, Caso de Estudo, faz referência ao *software* utilizado na presente dissertação e apresenta de modo detalhado o projeto em análise.

No capítulo 5, Análise de Resultados, discutem-se os resultados obtidos na modelação estrutural atendendo aos requisitos estabelecidos no manual técnico anteriormente referido.

O capítulo 6, Considerações Finais, faz um resumo das conclusões obtidas no estudo realizado e refere perspectivas de desenvolvimentos futuros.

2

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS

2.1. INTRODUÇÃO

Atualmente, em Portugal, o sector da construção de unidades industriais, apesar de todas as adversidades, tem tido um comportamento contrário relativamente aos outros sectores da área. A indústria tem procurado investir nas suas instalações e cada vez mais procura apresentar níveis de produção mais elevados e competitivos. Esta necessidade de crescimento gera a necessidade de ampliação de espaços, ou mesmo criação de novas áreas industriais que apresentem características compatíveis com as exigências associadas ao nível de produtividade que se pretende atingir neste tipo de estruturas.

A ocupação do território, cada vez maior, devido ao crescimento da população mundial ao longo dos anos, acompanhada de restrições ligadas a questões de carácter ambiental e urbanístico, têm feito com que a disponibilização de terrenos para novas construções se tenha tornado cada vez menor e os espaços para esse efeito se apresentem cada vez mais frequentemente com características geotécnicas menos competentes.

Em qualquer obra de engenharia civil, quer sejam edifícios, infraestruturas de transportes, túneis, pontes ou barragens, há transferência de cargas ao solo subjacente, do qual se espera um comportamento adequado, ou seja, que garanta estabilidade e segurança das estruturas idealizadas. As cargas das estruturas que é necessário transmitir às respetivas fundações são, muitas vezes, superiores às que o terreno tem possibilidade de suportar, pelo que surge um problema frequente: terrenos com características de deformabilidade e resistência insuficientes.

Nesse sentido, tem-se vindo a aplicar diferentes soluções consoante as condições encontradas no terreno. As soluções utilizadas passam geralmente por realizar transferências de carga para profundidades maiores, realizar a remoção do solo com características inadequadas e proceder à sua substituição por materiais controlados, alterar as características do solo existente, melhorando aquelas que vão interferir no seu desempenho, ou construir novas camadas sobre os terrenos existentes.

No caso dos pavimentos, é usual construir camadas de solos selecionados ou de agregados britados de granulometria extensa, para apoio das camadas superiores, as quais, normalmente, são construídas com betão de cimento ou misturas betuminosas.

Na presente dissertação são alvo de estudo pavimentos industriais, nomeadamente os seus requisitos funcionais e o comportamento do respetivo solo de fundação perante as solicitações a que estes estão normalmente sujeitos.

No presente capítulo será feita uma breve referência à evolução do setor industrial, seguida da apresentação dos tipos de pavimentos industriais e da constituição dos mais correntes.

Faz-se ainda uma descrição dos processos associados à prospeção geotécnica que usualmente se realiza no contexto da construção de pavimentos industriais e é feita uma descrição de vários ensaios utilizados em Portugal. Por fim, apresentam-se algumas técnicas de melhoramento de solos que podem ser levadas a cabo para melhorar as condições de fundação dos pavimentos industriais.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS

2.2.1. EVOLUÇÃO DO SETOR INDUSTRIAL

A primeira Revolução Industrial, que ocorreu no séc. XVIII, em Inglaterra, foi a alavanca que desencadeou os processos produtivos sistemáticos. A manufatura e o artesanato que, outrora, eram os meios mais utilizados, começaram a perder importância para dar lugar a novas técnicas de produção. Esta evolução veio a dar origem a um fenómeno que se designaria mais tarde por industrialização. Esse termo traduz a transformação que se deu através da substituição dos instrumentos, técnicas e processos de produção, o que também se manifestou em termos do território geográfico, uma vez que se começavam a construir na altura os primeiros edifícios industriais. Com a introdução do sistema mecanizado de produção, as unidades industriais que começavam a nascer deram início ao designado “sector fabril”. Na altura, a abertura de espaços que funcionavam única e exclusivamente para a produção sistematizada gerou novos conceitos e novos hábitos na vida da população que antes disso estava habituada a processos mais lentos e tempos de espera mais longos para obter determinados produtos. O sector que surgiu inicialmente foi o da área têxtil, que necessitava de espaços amplos para instalação de equipamentos específicos e para ocupação com um grande volume de pessoal. Nessa época os pavimentos ainda eram construídos com materiais aos quais se tinha fácil acesso como madeira ou mosaicos. Contudo, com a evolução da indústria e o crescimento cada vez maior das necessidades que advêm dessa evolução, os requisitos associados aos pavimentos começaram a ser mais exigentes em termos funcionais. As indústrias que vieram a surgir mais tarde, associadas também ao aparecimento do petróleo, trouxeram formas de produção mais complexas e a própria mão-de-obra tinha de ser mais qualificada para poder trabalhar nessas áreas. Além disso, também se começou a produzir em quantidades maiores, o que associado à maior complexidade das novas indústrias se traduziu em edifícios industriais de maior porte, logo, mais pesados, que exigiam maior cuidado a nível das instalações e dos pavimentos nas áreas onde se colocavam as maquinarias e equipamentos.

Devido à evolução verificada ao nível das exigências associadas aos novos equipamentos e às suas dimensões, os pavimentos eram construídos com materiais que apresentassem maior resistência como paralelepípedos de pedra ou materiais metálicos que protegessem a superfície do pavimento. Só mais tarde, quando se começou a verificar uma proliferação das centrais de betão em países cuja indústria apresentava um nível de desenvolvimento elevado, começaram a surgir novas exigências decorrentes, igualmente, do processo construtivo se ter desenvolvido.

Desde essa época até aos dias de hoje já muitos progressos aconteceram e, em particular, a recente evolução tecnológica, em meados do séc. XX, permitiu um avanço extraordinário para as indústrias e os seus processos de produção. Este setor sofreu um crescimento exponencial de produção que deu origem a necessidades cada vez maiores em termos de exigências normativas e requisitos associados às suas instalações. A prioridade dos exploradores das indústrias baseia-se em tornar os seus processos de produção o mais eficientes possível, o que se traduz em exigências de carácter técnico a nível de concepção e construção dos espaços industriais. Para os pavimentos industriais, aumentaram as exigên-

cias de regularidade geométrica, por se verificar que as características da superfície onde assentam os processos produtivos têm impactos diretos nos níveis de produtividade de determinadas indústrias. Segundo *Holtz* (2001), os grandes desenvolvimentos da engenharia estrutural, só foram possíveis devido à evolução tecnológica associada aos materiais de construção. A par das novas tecnologias, os processos de investigação de terreno, a conceção da estrutura dos pavimentos, os métodos construtivos e os materiais disponíveis permitem aos operadores obter melhores condições de produtividade e ao construtor proporcionar resultados mais eficientes.

2.2.2. TIPOS E CARACTERIZAÇÃO DE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS

Os pavimentos industriais, independentemente do tipo de indústria na qual estão enquadrados, são pavimentos que requerem uma atenção especial no que diz respeito à sua conceção, dimensionamento e método construtivo. Quando se toma conhecimento da finalidade para o qual um pavimento vai ser utilizado, existem vários requisitos que necessitam de ser atendidos, por exemplo ao nível da resistência mecânica dos elementos estruturais e dos revestimentos, mas também, em alguns casos, no que se refere à resistência a determinados agentes químicos. Nesse sentido, torna-se útil que seja feita uma classificação do tipo de pavimentos industriais consoante a sua finalidade no sector industrial. Sendo assim, há, por exemplo, a classificação segundo a ANAPRE, Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Rendimento (*Cristelli*, 2010), na qual se podem distinguir os diferentes tipos de pavimentos apresentados na Tabela 1.

No presente trabalho será abordado apenas o estudo de áreas de armazenamento, como designado segundo a ANAPRE, ou áreas logísticas, termo que também é comumente utilizado para referir este tipo de áreas.

Tabela 1 - Classificação de pavimentos quanto à utilização, segundo ANAPRE (adaptado de Cristelli, 2010)

Áreas Industriais	O pavimento deve ser considerado como equipamento para produção.
	Recebem a ação de cargas de equipamentos diretamente apoiados ou com fundações próprias.
	Deve tomar-se cuidado com aspetos especiais em fase de projeto, considerando linhas dinâmicas de produção, possíveis mudanças de configuração espacial em função da instalação de novos equipamentos.
	Utilização de revestimentos de alto desempenho. Proteção da superfície contra agentes agressivos, facilidade de manutenção (limpeza e higienização), aspetos estéticos e sinalização para controlo de fluxos.
Áreas de Armazenamento	O pavimento deve ser considerado como equipamento de produção uma vez que afeta diretamente a produtividade dos centros de distribuição.
	É preferível a utilização de um sistema com um número de juntas reduzido, com placas de grande dimensão, recorrendo a lajes de betão armado, com fibras ou pós-tensionado para evitar patologias nas juntas que derivam do trânsito intenso de maquinarias e empilhadores.
	Deve executar-se a aplicação de endurecedores de superfície, minerais ou metálicos, para garantir elevada resistência superficial mediante a grande solicitação de esforços abrasivos.
Áreas de Estacionamento	Apresentam maior durabilidade e resistência ao desgaste, aos ataques químicos de combustíveis e têm menor custo de manutenção do que os pavimentos asfálticos (aplicados em sistemas viários).
	Melhor logística de execução em zonas fechadas e pisos enterrados, uma vez que se utilizam equipamentos de menor dimensão.
Pavimentos Comerciais	Providenciam apoio de paredes divisórias e de <i>mezzanines</i> .
	Apresentam acabamentos decorativos através da aplicação de endurecedores de superfície com pigmentação apropriada.

As áreas de armazenamento, ou áreas logísticas, são caracterizadas por aglomerarem cargas elevadas, geralmente, associadas a mercadorias pesadas colocadas por equipamentos rolantes, como empilhadores, em estanterias que podem variar muito de altura, consoante o tipo de indústria e a dimensão que a mesma apresenta no mercado. Na Figura 1 pode observar-se um exemplo deste tipo de pavilhão. Além disso, se forem áreas de alto nível de armazenamento, apresentam frequentemente corredores muito estreitos que permitem apenas a passagem de empilhadores, ou outro tipo de equipamentos rolantes que apenas se movimentam em caminhos fixos e fazem a colocação e transporte dos materiais armazenados. Dada a tipologia de organização nestes espaços, surgem exigências associadas a estes pavi-

lhões que não são comuns encontrar noutro tipo de edifícios. Uma vez que se originam grandes concentrações de carga, quer sob os rodados do equipamento rolante (empilhadores) quer nos apoios das estruturas de suporte dos materiais armazenados, há uma transferência de elevadas cargas concentradas ao pavimento e do pavimento ao solo. Como tal, é necessário que todo o processo de conceção e construção dos pavimentos industriais seja realizado de forma rigorosa para garantir que, quando em funcionamento, o pavilhão industrial apresente condições para explorar da forma mais eficiente possível o espaço que tem disponível.



Figura 1 - Exemplo de uma área de armazenamento/logística (adaptado de <http://www.ssi-schaefer.com.br/armazenagem/porta-paleta.html>)

De uma forma geral, qualquer que seja a finalidade de um pavilhão industrial, é exigido que o pavimento do mesmo apresente determinadas características que permitam o bom funcionamento das atividades desenvolvidas no espaço. No caso particular de áreas logísticas, acrescentam-se requisitos associados a altos níveis de regularidade do pavimento uma vez que o objetivo primordial destes espaços é realizar uma gestão rápida e eficaz de mercadorias, existindo constantemente movimentação de cargas que deve ser efetuada do modo mais rápido possível.

No capítulo 3 deste trabalho é desenvolvido em mais detalhe o estudo de um guia que tem servido como orientação de projetos no sector da construção de pavilhões industriais, o *Technical Report 34 – Concrete Industrial Ground Floors, A guide to design and construction* (TR 34) (Concrete Society, 2014).

2.2.3. CONSTITUIÇÃO DE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS CORRENTES

Os pavimentos industriais têm a particularidade de serem concebidos e dimensionados de forma diferente dos pavimentos comuns uma vez que se apresentam sujeitos a cargas de magnitudes muito elevadas, exigindo do pavimento requisitos de resistência e outras características que não são necessárias noutros contextos. Conforme a utilização destinada para o espaço industrial, há requisitos específicos que se devem considerar no momento de conceção do pavimento, podendo obter-se diferentes soluções. Contudo, quando se tem que estabelecer a solução a adotar deve ter-se em conta a opção técnica que concilie o cumprimento desses requisitos com a melhor condição de custos.

Apesar de existirem diversas soluções que satisfazem os requisitos para a conceção e construção dos pavimentos industriais, pode considerar-se como uma estrutura modelo de carácter genérico a solução base de aplicação mais comum. Em geral, a estrutura de um pavimento industrial apresenta as seguintes camadas, a partir da superfície: laje de betão, uma membrana de separação, base, por vezes sub-base, solo de fundação ou subleito de fundação (Figura 2).

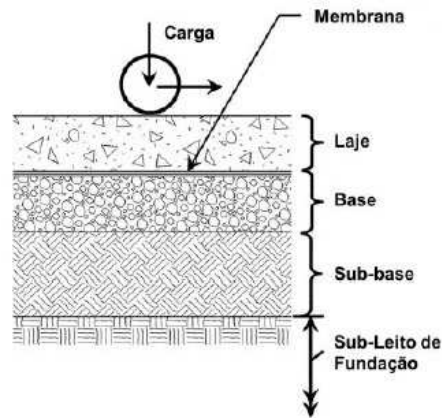


Figura 2 - Estrutura de pavimentos industriais (adaptado de ACI Committee 360, 2010)

2.2.3.1. Laje de Betão

A laje de betão é a camada superior do pavimento, ou seja, aquela que fica exposta a todo o tipo de solicitações ou ambientes agressivos para a superfície do pavimento. Por este motivo, e por ser aquela que entra em contacto direto com qualquer material ou equipamento que se vá instalar ou utilizar nas áreas industriais, esta camada é aquela que apresenta mais requisitos e é a mais importante. O desempenho desta camada vai ser totalmente condicionante no decorrer de todas as atividades que se pretendam praticar nas áreas industriais.

Como já foi referido, os pavimentos são sujeitos a solicitações de magnitudes muito elevadas nos ambientes industriais o que leva a que esta camada, em particular, deva apresentar uma resistência elevada. É de prática corrente que se execute um reforço da laje através de armaduras convencionais ou outro tipo de reforços como fibras ou armaduras pós-tensionadas.

As exigências normalmente requeridas para a superfície desta camada são muitas vezes aquilo que torna todo o processo de conceção e construção do pavimento mais complicados que os dos pavimentos correntes. A escolha de um material menos competente para a construção destes pavimentos pode ter repercussões a nível de desempenho da superfície na fase de exploração destas áreas, o que, por sua vez, irá afetar o desempenho da atividade industrial em causa.

Normalmente, esta camada é finalizada de acordo com as funcionalidades para as quais está definida a utilização da área industrial, apresentando uma superfície de desgaste adequada a essas condições.

2.2.3.2. Membrana de separação

A introdução da membrana de separação entre a camada de betão e a camada de base tem como principal objetivo diminuir o atrito criado entre as mesmas. Quando o betão, ou camadas subjacentes tratadas com cimento, sofrem retração geram-se esforços que podem levar ao aparecimento de fissuração

no pavimento em virtude do movimento estar condicionado pelo atrito entre camadas. Isto é solucionado através da introdução de uma membrana de plástico que evita tensões resultantes de fenómenos de retração. Além disso, a presença deste material funciona também como uma barreira evitando a movimentação de finos e água para camadas inferiores, ajudando no processo de cura do betão.

2.2.3.3. Base e Sub-base

A camada de base é aquela onde apoia a laje do pavimento. Esta camada deve garantir condições que permitam a construção da laje sobre uma plataforma bem nivelada e estável, além de que deve permitir a transmissão adequada de cargas da superfície do pavimento para a camada subjacente, que pode ser a sub-base ou o solo de fundação. A camada de sub-base que pode, ou não, ser inserida na constituição dos pavimentos industriais é geralmente concebida para que se possa evitar ter que construir uma camada de base com materiais mais dispendiosos, caso o solo subjacente apresente fracas características para desempenhar as suas funções. A base e a sub-base devem providenciar plataformas firmes para que possam decorrer as atividades de construção das camadas sobrejacentes.

2.2.3.4. Solo de Fundação

O solo de fundação, ou subleito de fundação, desempenha uma função de carácter muito importante no contexto geral da constituição dos pavimentos industriais. Esta camada é a responsável por absorver as solicitações impostas ao pavimento e suportar a própria estrutura do pavimento. O material constituinte desta camada pode ser o solo natural presente no local, podendo haver necessidade de se recorrer à sua estabilização mecânica ou com ligantes. Em alternativa, poderá ser necessário proceder ao saneamento desse solo e colocar solos selecionados de empréstimo. Assim, é necessário determinar as propriedades dos solos existentes, através de ensaios *in situ* e de ensaios laboratoriais.

2.3. PROSPEÇÃO GEOTÉCNICA PARA CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS

Qualquer projeto de engenharia civil requer que se tome conhecimento das condições do terreno onde se pretende realizar os trabalhos de construção. As operações de prospeção têm como principais objetivos: avaliar se o local da obra e a sua envolvente são adequados para a implantação das estruturas e para os trabalhos previstos; permitir a preparação de um projeto adequado e económico, incluindo a definição de trabalhos temporários que possam ser necessários; planear o melhor método de construção em função das condições existentes; avaliar as alterações que podem surgir com o andamento dos trabalhos e os efeitos das mesmas (BSI, 1981).

Quanto à investigação do terreno necessária para a conceção de pavimentos industriais, é de prática comum realizar um reconhecimento geral do local e, posteriormente, um planeamento das atividades necessárias para fazer a devida descrição e caracterização do solo presente na área de construção.

Numa primeira fase, no que diz respeito aos trabalhos geotécnicos, reúne-se a informação disponível e realiza-se um reconhecimento geológico-geotécnico preliminar e uma prospeção geotécnica, que irão permitir obter informações suficientes para que se tome conhecimento da constituição do local e das características do solo. A fase anterior aos trabalhos de campo não deve ser menosprezada uma vez que todo o conhecimento adquirido relativo ao terreno vai ser fundamental no planeamento de trabalhos futuros. O custo associado a estes estudos quer fora, quer no local de intervenção, é relativamente baixo no contexto geral da obra. Um bom estudo do terreno pode contribuir para a diminuição de cus-

tos da obra, uma vez que se podem evitar ou prever ocorrências desfavoráveis, antecipando o modo como se podem resolver ou contornar as mesmas.

Anteriormente à visita de campo, onde se faz o reconhecimento de superfície do local, inicia-se a recolha de informação sobre o local, nomeadamente, de registos existentes relativos a geologia, geomorfologia, sismicidade, hidrologia, história do local, cartografia, relatórios de estudos ou ensaios pré-existentes, e qualquer outro tipo de informação que possa ser relevante para o conhecimento do terreno e do seu comportamento. Caso seja útil e esteja disponível, também podem ser recolhidos dados relativos ao terreno envolvente. Por vezes torna-se fundamental compreender como é a envolvente da área de construção para que as atividades planeadas não venham a intervir com o terreno envolvente ou para garantir simplesmente o bom funcionamento das mesmas. Por vezes é possível também consultar imagens aéreas do terreno em questão, o que pode ser muito útil para o trabalho de reconhecimento a efetuar. Em princípio, quanto maior for o volume de dados relativos ao local, mais profunda poderá ser a sua caracterização preliminar.

Após a fase de recolha e tratamento de informação é elaborado um programa de prospeção geotécnica. Para que sejam determinadas as propriedades intrínsecas e de estado dos solos e rochas é necessário recorrer a sondagens, ensaios *in situ* e laboratoriais. Estas atividades podem ser enquadradas por diversas normas internacionais, como por exemplo: BS EN 1997-1:2004 - *Eurocode 7 – Geotechnical Design – Part 1 General Rules* (BSI, 2004); BS EN 1997-2:2007 - *Eurocode 7 – Geotechnical Design – Part 2 Ground Investigation and testing* (BSI, 2007); BS 5930:1981 – *Code of Practice for site investigations* (BSI, 1981); BS 1377 - *Methods of test for soils for civil engineering purposes – Part 1 to 9* (BSI, 1990).

2.3.1. SONDAGENS

As sondagens são um meio de investigação do terreno que podem permitir a recolha de amostras do solo. Podem distinguir-se três métodos de sondagens: sondagem de penetração, sondagem de furação à percussão e sondagem de furação à rotação.

Nas sondagens de penetração não se conseguem obter amostras do solo, quer indeformadas quer remexidas, para análise. Geralmente, através de uma vara de aço de ponta cónica é penetrado o terreno por percussão, de modo contínuo ou não, por meio de macacos hidráulicos ou de simples martelos. À medida que se vai avançando na penetração do terreno vão sendo acopladas varas para acompanhar a profundidade que vai sendo atingida. Através deste tipo de sondagens investiga-se a maior ou menor resistência do terreno à penetração e não mais que isso, uma vez que não se retiram amostras do solo.

As sondagens de furação à percussão podem ser utilizadas em todo o tipo de solos ou em rochas brandas. Esta técnica é executada por meio de ação de impactos repetidos de um trépano que cai em queda livre depois de posicionado acima da superfície do terreno. Na Figura 3 apresentam-se esquemas relativos à sondagem de percussão em termos gerais e peças utilizadas na execução desta técnica. É através da desagregação que vai ocorrendo à medida que se efetuam os impactos que depois se conseguem obter amostras remexidas. Segundo Matos Fernandes (2011), este processo baseia-se na técnica de desagregação por fadiga. De facto, o solo vai sofrendo impactos repetidos, desintegrando-se, sendo possível atingir sucessivamente profundidades maiores. O processo de extração da amostra é efetuado através da introdução de uma peça tubular denominada limpadeira que é colocada no furo. Depois da mesma estar preenchida com o solo, é retirada e obtém-se assim uma amostra remexida para análise. Em qualquer fase da furação é possível interromper a sondagem e executar a extração de amostras ou realizar ensaios *in situ*. Esta técnica apresenta vantagens associadas à sua simplicidade de execução e

adaptabilidade a situações correntes mas tem as desvantagens de necessitar de maiores meios humanos e mais tempo para a sua execução (Matos Fernandes, 2011).

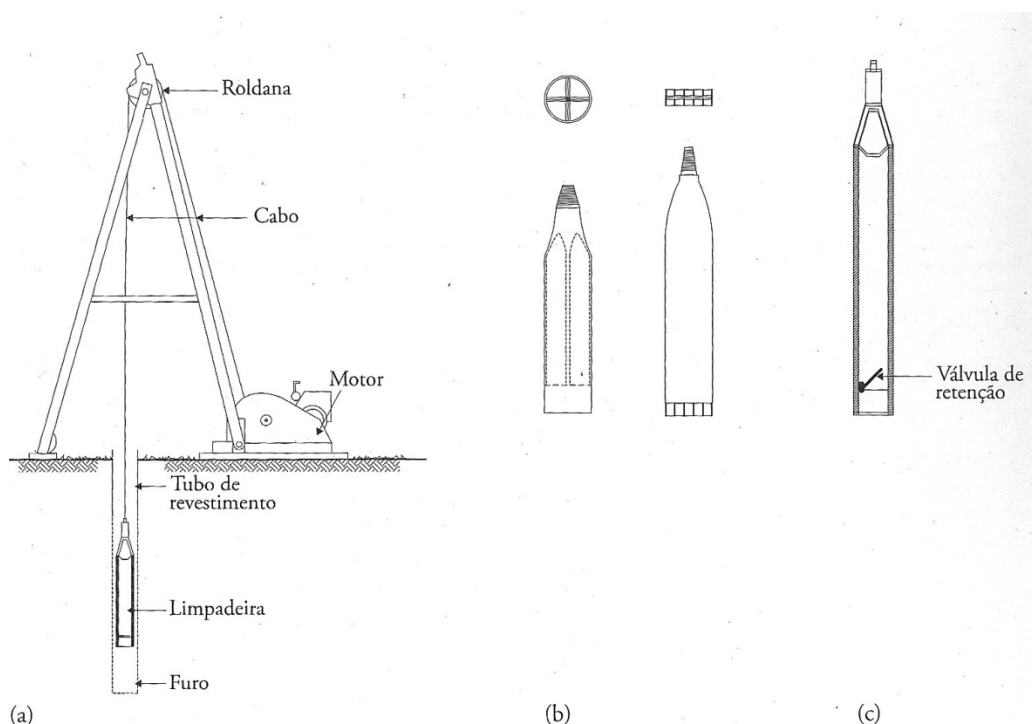


Figura 3 - Sondagem à percussão: a) esquema geral do ensaio; b) equipamentos; c) limpadeira. (Matos Fernandes, 2011)

Por fim, as sondagens de furação à rotação conciliam o processo de furação e de amostragem, contrariamente ao que acontece com as sondagens de furação à percussão que executam estes processos de forma distinta e independente. As sondagens de furação à rotação têm por base a utilização de uma ferramenta abrasiva denteada denominada coroa, instalada na extremidade de um tubo amostrador (Matos Fernandes, 2011). O que acontece nesta técnica é que a extremidade do tubo vai conseguir perfurar o solo através da sua rotação e à medida que vai conseguindo alcançar maiores profundidades está em simultâneo a recolher uma amostra cilíndrica do terreno que fica no seu interior. Todo o processo de furação é acompanhado da injeção, a partir da superfície, de um fluido que ajuda na perfuração do terreno, no arrefecimento da coroa e na evacuação das partículas que se soltam no processo de furação.

As sondagens são muitas vezes o meio de atingir determinadas profundidades para realizar os ensaios *in situ* e são, como já foi referido, técnicas que permitem estudar a constituição do terreno podendo, ou não, obter-se amostras do mesmo.

2.3.2. ENSAIOS *IN SITU*

A definição dos locais a investigar, a quantidade de ensaios a executar e os dados a recolher vão depender dos dados previamente existentes e das necessidades do projeto.

A nível global, existe um conjunto de ensaios muito amplo que permite recolher os mais variados dados relativos ao terreno. Nesta dissertação serão alvo de análise apenas os ensaios mais frequentemente-

te realizados em Portugal, nomeadamente, o ensaio SPT - *standard penetration test*, o ensaio CPT - *cone-penetration test*, o ensaio DPSH - *dynamic probing super heavy*, o ensaio PLT - *plate load test* e o ensaio FWD - *falling weight deflectometer*. Os três primeiros são o tipo de ensaio que permite a caracterização do terreno em profundidade enquanto os últimos fazem uma análise em superfície.

Para todos os ensaios referidos, com exceção do FWD, a norma europeia BS EN 1997-2:2007 (BSI, 2007) é o documento que dá indicações sobre os objetivos, requisitos e avaliação de resultados dos ensaios, referindo, eventualmente, outras normas aplicáveis especificamente para cada ensaio.

2.3.2.1. Ensaio SPT (*Standard Penetration Test*)

O ensaio SPT é o ensaio *in situ* mais utilizado a nível mundial, apresenta custos reduzidos e o seu procedimento não é muito complexo. O SPT é aplicável desde argilas até cascalhos finos e rochas brandas, contudo, a nível prático, é preferencial a aplicação deste ensaio a solos arenosos. Não é aplicável a execução deste ensaio em argilas moles ou siltes.

O meio de acesso a este ensaio é realizado através de um furo de sondagem, a partir do qual é possível obter amostras remexidas para ensaios de identificação. A execução do SPT tem como principal objetivo a determinação do índice de compacidade, I_D , e o ângulo de resistência ao corte, ϕ' , de areias. Estes parâmetros não são medidos diretamente a partir do ensaio, mas sim estimados a partir dos resultados obtidos no mesmo.

A norma europeia BS EN 1997-2:2007 (BSI, 2007) faz referência à norma BS EN ISO 22476:2005 - *Geotechnical investigation and testing — Field testing, British Standards Institution – Part 3: Standard Penetration Test* (BSI, 2005), que indica os métodos de execução do ensaio.

Para realizar os procedimentos do ensaio SPT propriamente dito é necessário que seja executado, previamente, um furo de sondagem e que o fundo do mesmo seja limpo. Depois desse processo, um amostrador normalizado (Figura 4) é cravado no fundo do furo através de pancadas de um martelo de 63,5 kg que realiza uma queda de 76 cm sucessivamente em duas fases distintas. Na primeira fase, a cravação é feita com a penetração de 15 cm e na segunda é feita, sequencialmente, de 15 mais 15 cm, perfazendo no total 45 cm de profundidade de penetração atingida. A amostra remexida que se consegue obter é correspondente aos últimos 30 cm de penetração do ensaio, uma vez que os primeiros 15 cm servem para ultrapassar uma primeira camada de solo remexido. Em regra, a cravação do amostrador é efetuada com um espaçamento de 1,5 metros.



Figura 4 - Amostrador normalizado de *Terzaghi* (Matos Fernandes, 2011)

O parâmetro medido neste ensaio consiste no número de pancadas realizadas para a penetração da segunda fase de cravação do ensaio, ou seja, dos 15 mais 15 cm, sendo indicado como N , o resultado obtido do ensaio. O número de pancadas dos primeiros 15 cm também é registado apenas por uma questão de registo de informação.

Caso se atinjam as 60 pancadas na primeira fase de cravação ou o mesmo número seja atingido na segunda fase sem penetração de 30 cm, o ensaio é interrompido, registando-se a profundidade obtida de penetração (Matos Fernandes, 2011). A esta situação designa-se, geralmente, por “nega”. Ainda assim, pode ser determinado, por extrapolação, o número de pancadas que seria necessário para atingir uma profundidade de 30 cm, na segunda fase.

Quando se finaliza o processo de cravação e se passa à remoção do amostrador, tem-se acesso à amostra remexida que irá permitir que um técnico proceda à sua análise para a definição da estratigrafia do terreno. O tratamento de resultados passa também pela correção do parâmetro medido no ensaio, uma vez que o SPT não é um ensaio verdadeiramente normalizado. De modo a normalizar a leitura obtida no ensaio SPT são feitas várias correções, uma vez que há diversas variáveis que influenciam o valor medido. Essas correções são realizadas através de coeficientes corretivos que, multiplicados pelo valor determinado no ensaio, N , conduzem ao resultado do ensaio normalizado e corrigido, $(N_1)_{60}$. O valor do resultado do ensaio normalizado e corrigido é obtido através da equação 1, onde os coeficientes corretivos para a energia e para a tensão efetiva à profundidade do ensaio, C_E e C_N , são aceites de forma consensual, enquanto os coeficientes relativos ao trem de varas e ao diâmetro do furo, C_R e C_D , já não o são. Existem autores que consideram estes dois últimos coeficientes como unitários, enquanto outros realizam a correção considerando todos os coeficientes integrantes na equação (Matos Fernandes, 2011).

$$(N_1)_{60} = C_E C_R C_D C_N N \quad (1)$$

Em função dos resultados obtidos nos ensaios SPT, é usual caracterizar os terrenos arenosos de acordo com o apresentado na tabela seguinte.

Tabela 2 - Classificação de maciços terrosos quanto à compacidade (adaptado de Matos Fernandes, 2011)

N.º Pancadas N (SPT)	Compacidade	Índice de compacidade (%)
0 - 3	Muito Solto	15
3 - 8	Solo	15 - 35
8 - 25	Medianamente compacto	35 - 65
25 - 42	Compacto	65 - 85
> 42	Muito compacto	85 - 100

2.3.2.2. Ensaio CPT (*Cone-penetration test*)

O ensaio do cone-penetrómetro holandês, CPT, é um ensaio *in situ* muito utilizado atualmente. Em relação ao SPT, este ensaio tem a vantagem de ser totalmente automatizado, ou seja, os resultados obtidos não dependem dos técnicos que executam o procedimento. Contudo, em relação ao ensaio SPT, este não permite a recolha de amostras pelo que se torna um ensaio puramente *in situ*.

O CPT determina automaticamente parâmetros como a resistência de ponta, q_c , e a resistência lateral, f_s . Outros parâmetros podem ser estimados teórica ou empiricamente a partir dos medidos diretamente no ensaio.

Tal como para o ensaio SPT, para o CPT, a BS EN 1997-2:2007 (BSI, 2007) refere os documentos normativos que orientam os procedimentos a efetuar durante o ensaio, nomeadamente, a BS EN ISO 22476-1:2012 - *Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 1: Electrical cone and piezocone penetration tests* (BSI, 2012a) e a BS EN ISO 22479-12:2012 - *Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 12: Mechanical cone penetration test* (BSI, 2012c).

A execução do ensaio CPT recorre à cravação contínua no solo de uma ponteira de aço, por meio de um sistema hidráulico, que apresenta características que lhe permitem efetuar medições imediatas. A ponteira de aço é dotada de uma extremidade cônica e uma manga. Nessa extremidade está instalado um sistema que faz a leitura contínua da resistência de ponta, q_c , e na manga é medida a resistência lateral atrítica, f_s .

Também existe um cone elétrico que contém sensores que fazem as mesmas medições e contém um filtro anelar adicional entre a ponteira do cone e a manga, como se pode verificar na Figura 5, que faz a medição da pressão na água dos poros. Esse cone denomina-se de piezocone e o ensaio de *piezocone penetration test*, CPTU.

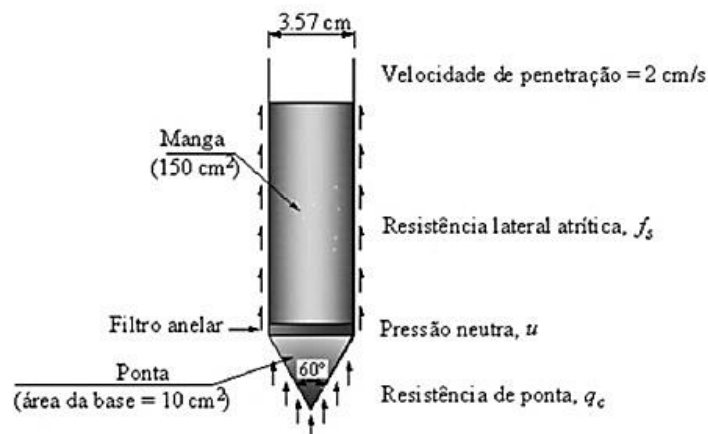


Figura 5 - Esquema da ponteira do CPT (Matos Fernandes, 2011)

Este ensaio, pela sua leitura contínua de dados, permite detetar as várias camadas presentes no terreno em análise, mesmo as mais finas, que em outros ensaios poderiam não ser detetadas. Deste modo, a definição da estratigrafia do terreno apresenta uma reprodutibilidade de resultados muito boa.

2.3.2.3. Ensaio DPSH (*Dynamic Probing Super Heavy*)

O ensaio DPSH é um ensaio *in situ* de maior aplicabilidade a terrenos arenosos e está inserido num grupo de ensaios denominados de ensaios com penetrómetros dinâmicos (*dynamic probing test*, DP). Este é um processo de prospeção já muito antigo e simples pelo que, ao longo dos anos, se foram criando variações do ensaio, dos quais se salienta, na presente dissertação, o ensaio considerado superpesado cuja massa que exerce força é superior a 60 kg.

Na norma BS EN 1997-2:2007 é referido como documento a seguir para a prática deste ensaio a BS EN ISO 22476-2:2012 - *Geotechnical investigation and testing — Field testing, British Standards Institution, Part 2: Dynamic probing* (BSI, 2012b).

Através do DPSH é determinado o número de golpes realizados com um martelo ou um pilão de massa em queda livre a partir de uma determinada altura sobre um batente com uma ponta cónica que vai sendo penetrado no terreno. Durante o ensaio não são recolhidas quaisquer amostras do solo mas é medido em tempo real o comprimento de penetração que vai sendo atingido, permitindo que, mais tarde, seja aferido o ângulo de atrito, ϕ' , e o módulo de deformabilidade, E.

Este ensaio, pela sua simplicidade, rapidez e baixo custo pode ser conciliado com a aplicação de outros ensaios mais dispendiosos, permitindo uma adequada e económica caracterização do solo. Na Figura 6 pode observar-se um exemplo de um equipamento que realiza este tipo de ensaios.



Figura 6 - Equipamento de execução do ensaio DPSH (adaptado de http://geocastum.it/indagini_geotecniche.php)

2.3.2.4. Ensaio PLT (*Plate Load Test*)

O ensaio de carga em placa, PLT, é um ensaio *in situ* utilizado quando se pretende caracterizar a deformabilidade de um terreno.

Na norma BS EN 1997-2:2007 (BSI, 2007) são referidos documentos normativos específicos para este ensaio, nomeadamente, a BS EN ISO 22476-13:2012 - *Geotechnical investigation and testing — Field testing - Part 13: Plate Load Testing* (BSI, 2012d).

O PLT consiste no carregamento de uma placa circular de aço e no registo dos assentamentos verificados, à medida que vai sendo aplicado o carregamento (Figura 7). É importante salientar que o ensaio

deve ser feito sobre uma superfície devidamente preparada, apresentando os requisitos de nivelamento e perturbação do terreno, exigidos nas normas já referidas.

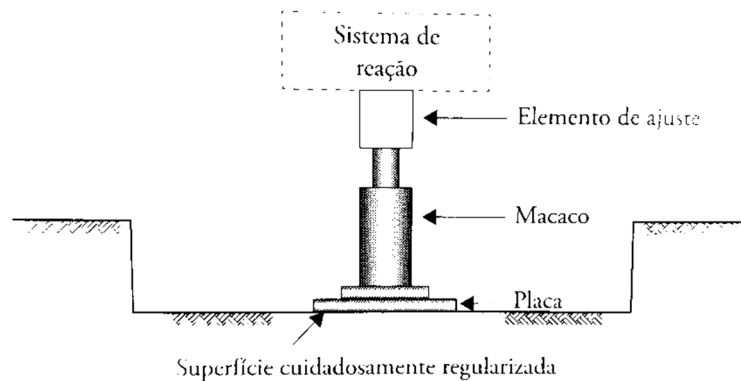


Figura 7 - Esquema simplificado do ensaio PLT (Matos Fernandes, 2011)

Nos casos em que se analisam camadas de infraestruturas de transporte é habitual utilizar a norma de ensaio de carga francesa NF 2000 P94-117-1 (AFNOR, 2000).

Segundo esta norma, a placa é submetida a dois ciclos de carga e descarga, correspondentes a pressões máximas, respetivamente, de 250 e 200 kPa. Através dos assentamentos registados, e considerando a teoria da elasticidade, determinam-se os valores do módulo (E_v) associados a cada um dos ciclos de carregamento, E_{v1} e E_{v2} , considerando:

$$E_v = 0,75 b \times \frac{\Delta q_s}{s} \quad (2)$$

em que:

- Δq_s é a variação de pressão de contacto aplicada no ensaio;
- s é a variação de assentamentos registada quando aplicada a variação de pressão Δq_s ;
- b é o diâmetro da placa.

A partir da relação entre estes valores é também possível estimar o estado de compactidade do solo. Embora dependa das características granulométricas dos materiais, usualmente considera-se que um solo bem compactado deve apresentar valores desta relação inferiores a dois.

A título de exemplo, na Figura 8 é apresentado um esquema tipo de registo de resultados de um ensaio PLT segundo a norma francesa NF-P94-117-1 (AFNOR, 2000), onde se consegue verificar que houve a execução de dois ciclos de carga. Os declives das retas correspondentes aos carregamentos traduzem a relação entre a variação de tensão e assentamentos, podendo-se aferir daí os valores dos módulos E_{v1} e E_{v2} .

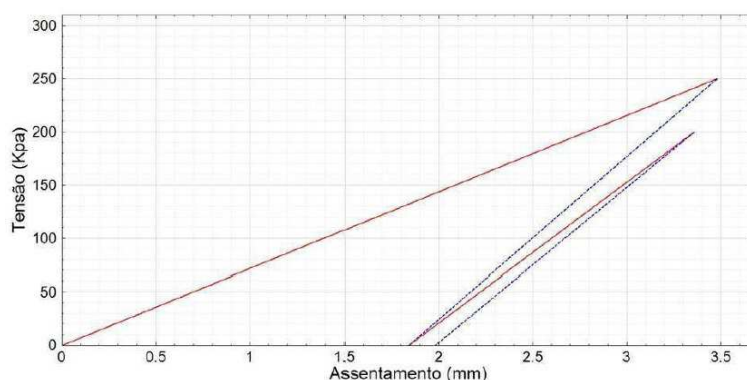


Figura 8 – Esquema tipo de registo de resultados de um ensaio PLT segundo a norma francesa NF-P94-117-1 (AFNOR, 2000)

2.3.2.5. Ensaio FWD (*Falling Weight Deflectometer*)

O ensaio FWD, ou defletómetro de impacto, é um ensaio *in situ* utilizado em pavimentos para avaliar o seu desempenho. Este ensaio consiste na aplicação, através de uma placa circular, de uma força de impulso resultante de uma massa que sofre uma queda de uma dada altura, havendo um registo das deflexões do pavimento em pontos diversos.

A força aplicada pode ser diversa, dependendo do peso da massa que sofre a queda, da altura a que a mesma cai e do número de amortecedores aplicados ao sistema de ensaio. Quanto à medição das deflexões, esta é feita em vários pontos ao longo do pavimento, devido à existência de transdutores que registam os deslocamentos do pavimento durante o impacto. O equipamento utilizado para o procedimento, como se pode verificar na Figura 9, apresenta alguma complexidade e volume. Existe uma outra forma de realizar este ensaio, utilizando um defletómetro de impacto portátil, que efetua medições semelhantes, mas é mais fácil de manusear, o que torna o ensaio mais expedito e económico (Fortunato, 2005).

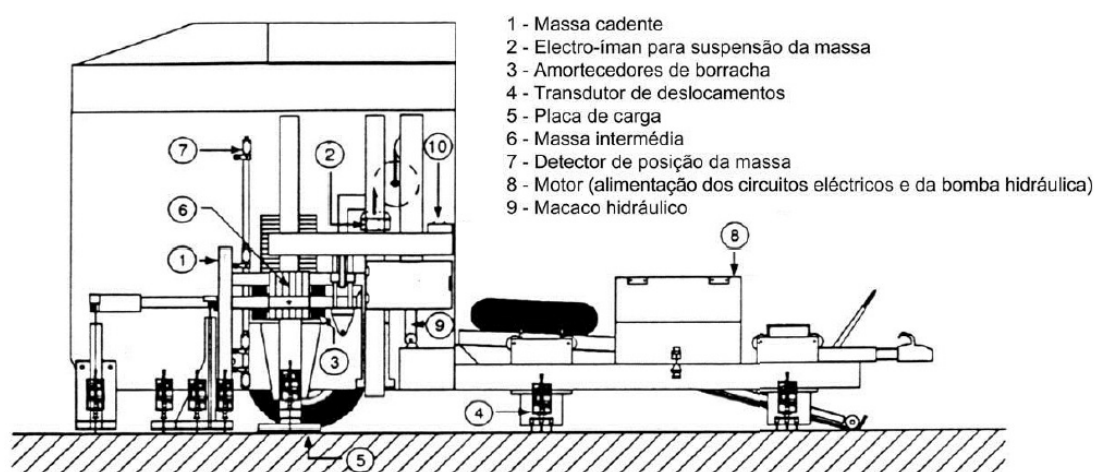


Figura 9 - Esquema do Equipamento do ensaio FWD (Fortunato, 2016)

O ensaio com o FWD não se apresenta normalizado. Contudo, existem referências que ajudam a aplicação deste procedimento e o validam como sendo um ensaio útil e de resultados fiáveis que tem vindo a ser aplicado em Portugal em diversos casos (Fortunato, 2005). A vantagem da aplicação deste ensaio relativamente ao PLT é que é de execução muito mais rápida, permitindo assim obter muita

informação de forma económica. Por outro lado, ao medir a deflexão em vários pontos, a distintas distâncias do centro da placa de carga, permite obter uma bacia de deflexões, a qual é particularmente útil no âmbito da retroanálise que pode ser realizada para obter os valores do módulo de deformabilidade de distintas camadas de um meio estratificado, como são os pavimentos.

2.4 TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE SOLOS

É cada vez mais frequente surgir a necessidade de realizar obras de engenharia civil em solos pouco competentes que apresentam características inadequadas, à partida, para responder positivamente às exigências requeridas para os solos de fundação. Contudo, com o avanço das técnicas de melhoramento de solos, que têm vindo a ser cada vez mais utilizadas, é possível realizar construções sobre esses terrenos que, após intervenções adequadas se tornam aptos para servir de terreno de implantação de vários tipos de construções.

Os solos podem ser melhorados através da adição de ligantes ou por colocação de inclusões discretas, as quais podem ter uma densidade espacial e profundidade diversas. Referem-se em seguida algumas das técnicas de melhoramento de solos que têm vindo a ser aplicadas em Portugal, em particular na construção de pavimentos industriais, nomeadamente: colunas de brita (vibrosubstituição); consolidação por geodrenos verticais, no que diz respeito a intervenções em profundidade; e geossintéticos, salientando-se a aplicação de geogrelhas.

2.4.1. TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE SOLOS EM PROFUNDIDADE

2.4.1.1. Colunas de Brita

A execução de colunas de brita é uma técnica de melhoramento de solos que se baseia na inclusão no terreno de colunas de um material britado, com um certo espaçamento, de modo a melhorar algumas das suas características. A aplicabilidade desta técnica expande-se a todo o tipo de solos e não envolve, geralmente, remoção do material existente. A introdução do material granular de grande permeabilidade acelera a consolidação dos terrenos envolventes e induz-lhes uma compactação adicional o que conduz a uma melhoria das suas características geotécnicas. Para além disso, as colunas de brita, funcionam mecanicamente confinadas pelos solos envolventes (Figura 10), representando um acréscimo significativo da resistência ao corte e da rigidez global dos terrenos (Domingues, 2006).

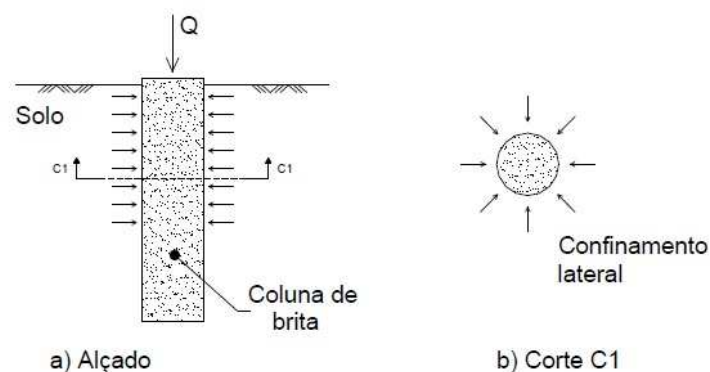


Figura 10 - Esquema de uma coluna de brita (Domingues, 2006)

A inserção das colunas no terreno é feita, geralmente, por vibrosubstituição, que consiste na instalação das colunas no solo por meio de vibradores dimensionados para trabalhar em profundidade (Viana da

Fonseca, 2014). Esses equipamentos podem realizar a aplicação das colunas em meio seco ou meio húmido, consoante as condições encontradas no terreno. A diferença entre esses dois meios de aplicação reside na injeção de fluidos: por via húmida utiliza-se água e por via seca apenas o ar, tendo ambos a função de auxiliar o processo de introdução da sonda que irá colocar a brita no solo. Após ser atingida a profundidade desejada, o furo realizado vai sendo preenchido com o material britado à medida que a sonda executa um movimento ascendente e descendente, por patamares, de forma a criar um cilindro de material muito bem compactado, até se atingir novamente a superfície e estar criada a coluna de brita. Na Figura 11 podem verificar-se dois esquemas da instalação de colunas de brita por meio húmido e seco.

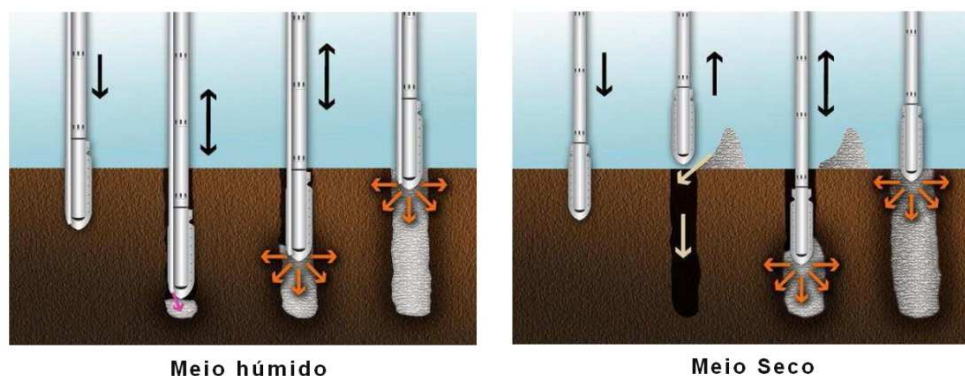


Figura 11 - Método de instalação de colunas de brita em meio húmido e seco (Viana da Fonseca, 2014)

A distribuição das colunas no terreno é realizada segundo um dimensionamento que tem como base a área de influência das colunas, o diâmetro das mesmas e os assentamentos aceitáveis definidos em projeto. Pretende-se sempre obter uma distribuição uniforme das colunas para que as mesmas possam desempenhar as suas funções de melhoramento do solo. Esta técnica assume o conjunto de colunas como uma malha que funciona como um todo, como um conjunto de células, em que a unidade é a coluna isolada. Se a malha não for regular e uniformemente distribuída podem não ser atingidos os objetivos da implantação das colunas e fica sem efeito a aplicação desta técnica. Como resultado do dimensionamento resultam distribuições de colunas com malhas triangulares, quadradas ou hexagonais (Assunção, 2010), como se pode ver esquematicamente na Figura 12.

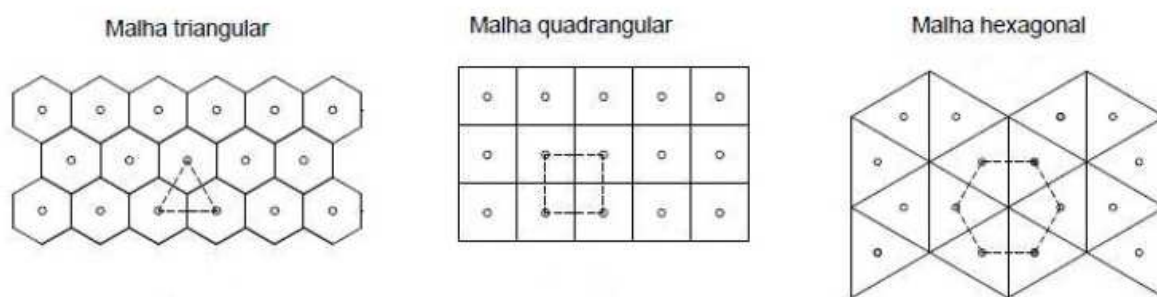


Figura 12 - Distribuição em planta de colunas de brita (Assunção, 2010)

2.4.1.2. Geodrenos Verticais

Os geodrenos verticais são um método de melhoramento de solos que tem como objetivo principal a aceleração do processo de consolidação, visando obter de modo mais rápido a estabilidade do solo. Esse objetivo é conseguido uma vez que os geodrenos são constituídos por materiais de alta permeabilidade e são capazes de suportar os esforços gerados pelo processo de cravação e pelos movimentos resultantes da consolidação do terreno, criando caminhos de fluxo de água mais curtos e permitindo que o processo de dissipação de poro-pressões seja acelerado. Essa criação de caminhos de fluxo gera um escoamento radial em torno dos drenos que se repercute num aumento da velocidade de escoamento na direção horizontal (Figura 13). A aplicabilidade desta técnica expande-se a solos moles que, muitas vezes, demoram longos períodos de tempo a atingir a estabilidade.

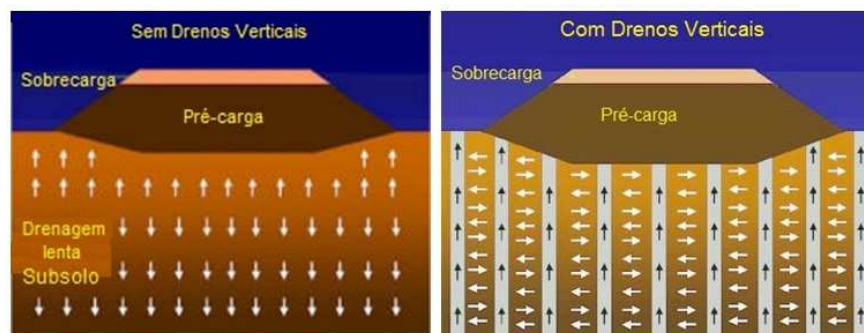


Figura 13 - Caminho da água em ausência e presença de drenos verticais (Adaptado de Sousa, 2011)

A instalação do material no terreno é realizada por aparelhos de cravação de pequeno porte e geralmente a instalação é seguida da aplicação de uma pré-carga na superfície do terreno, através da construção de um aterro provisório, o que ajuda a acelerar ainda mais todo o processo de consolidação. Enquanto os geodrenos encurtam o caminho que a água tem que percorrer para ser expulsa do terreno, a carga vai acelerar o processo de consolidação, havendo um rearranjo da disposição das partículas do solo que resulta na diminuição dos vazios. Em conjunto, o material inserido no terreno e a sobrecarga produzida pelo aterro diminuem o tempo necessário para que se atinja a estabilidade do solo.

2.4.2. TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE SOLOS À SUPERFÍCIE COM GEOSSINTÉTICOS

2.4.2.1. Aspetos gerais

Dentro das técnicas de melhoramento de solos existentes, os geossintéticos incorporam um grupo que atua à superfície do terreno. Estes materiais, cuja aplicação teve início nos anos 70, têm vindo a ser cada vez mais utilizados na prática corrente de obras de engenharia geotécnica. Sendo de instalação relativamente rápida e fácil, além de serem boas alternativas à aplicação de métodos mais convencionais, os geossintéticos permitem o aproveitamento de terrenos que, à partida, seriam menos adequados.

Em geral, os geossintéticos são materiais plásticos, polímeros feitos de hidrocarbonetos, embora também se possam encontrar fibras de vidro, borracha e materiais naturais. A maioria dos geossintéticos é produzida através de polímeros como propilenos, poliéster, polietilenos, poliamidas, PVC, entre outros. Este tipo de materiais resiste bem à degradação de origem biológica ou química enquanto os materiais naturais como o algodão, bambu, e outros, se degradam com o tempo, sendo utilizados em particular em geotêxteis e geogrelhas para trabalhos temporários, uma vez que apresentam menor durabilidade.

Os produtos sintéticos têm sido cada vez mais utilizados em oposição aos de origem natural e apresentam uma variedade muito interessante no sentido de possibilitar a sua aplicação a uma gama mais ampla de situações. Segundo *Holtz* (2001), nos anos 70 era possível encontrar uns cinco ou seis tipos de geossintéticos, porém, atualmente, existem mais de 600 tipos diferentes que são comercializados a nível mundial.

A aplicação de geossintéticos no solo é uma técnica que pode ser utilizada para desempenhar diferentes funções e, na maioria das vezes, desempenhando mais que uma em simultâneo. Segundo *Koerner* (2005), há cinco funções principais para os quais se aplicam estes materiais, nomeadamente, separação, reforço, filtragem, drenagem e barreira de fluídos. A função de separação pretende criar uma barreira física entre diferentes materiais, impedindo a mistura entre os materiais adjacentes. A presença de um geossintético que desempenha essa função irá evitar a passagem de partículas de umas camadas para outras. Quanto ao reforço, esta função diz respeito à parte da técnica propriamente dita do melhoramento do solo, uma vez que o que se pretende é utilizar o comportamento tensão-deformação de um geossintético para melhorar as propriedades mecânicas do solo, ou outros materiais de construção. Quanto à filtragem, esta permite que haja movimentação de fluídos entre as camadas, realizando uma retenção das partículas do solo ou outros materiais. A função de drenagem consiste em transportar fluídos, geralmente água, através do próprio material do geossintético; a barreira de fluídos é a função que pretende precisamente o oposto da drenagem, impedindo a migração de fluídos entre as camadas do terreno.

Dentro do grupo de produtos geossintéticos podem distinguir-se os geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompósitos e, mais recentemente, tem surgido a aplicação de geocélulas.

2.4.2.2. Geogrelhas

As geogrelhas são um tipo de geossintético que têm vindo a apresentar um rápido crescimento no sector deste tipo de materiais. Tendo como principal função o reforço do solo, estes produtos são muitas vezes apresentados como alternativa, ou complemento, de outras técnicas de melhoramento de solos.

Este tipo de geossintético, caracterizado por apresentar uma percentagem de aberturas maior que a área do material que o constitui e uma configuração tipo grelha, permite melhorar o comportamento do solo por efeito de confinamento (Figura 14). Este efeito deve-se ao bloqueio de movimento que a grelha impõe às partículas. Quando se exerce uma carga no solo haverá uma tendência para o material granular se ajustar a uma nova disposição de modo a diminuir espaços entre partículas gerando assentamentos significativos no mesmo. Contudo, com a presença de uma geogrelha, quando essa força é exercida, na zona de contacto entre o material granular e a geogrelha, haverá uma tendência para criar forças de tração na mesma que irão diminuir substancialmente os assentamentos do solo.

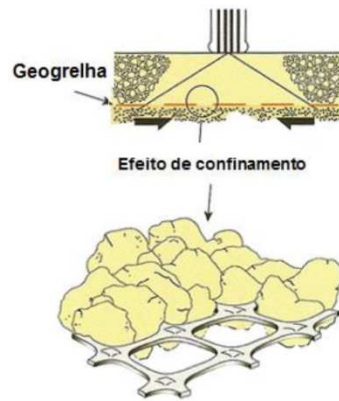


Figura 14 - Efeito de confinamento gerado por geogrelhas (adaptado de http://www.globalturfconsult.com/pdf/SS_Biaxial_Geogrids.pdf)

As geogrelhas, dependendo do polímero constituinte e do seu processo de fabrico, apresentam características de resistência à tração e rigidez diferentes. Dependendo das condições em que estas serão inseridas, há a necessidade de se recorrer a métodos de dimensionamento por forma a seleccionar o material mais apropriado ao estado de tensão presente no terreno. Usadas essencialmente para reforço, as geogrelhas podem resistir numa direção, ou em duas direções perpendiculares, pelo que são comumente designadas, respetivamente, por geogrelhas uniaxiais e biaxiais. Conforme as necessidades da estrutura em que vão ser incorporadas, determina-se o tipo de geogrelha a utilizar.

3

REQUISITOS DE PAVIMENTOS INDUSTRIAIS

3.1. ASPETOS GERAIS

O objetivo que se pretende alcançar em qualquer tipo de projeto passa por conseguir obter a máxima eficiência das estruturas construídas. No caso particular de pavimentos industriais em áreas de armazenamento, apenas se consegue alcançar esse objetivo se as condições de armazenamento, os equipamentos utilizados e o pavimento forem concebidos e operados dentro das tolerâncias e requisitos necessários. O desempenho de um pavimento vai ser dependente das especificações que lhe são impostas em projeto e das técnicas utilizadas para a sua construção. Contudo, deve também prever-se desde início datas para realizar operações de manutenção que sejam necessárias para manter o desempenho do espaço durante o seu período de serviço.

Os projetos de pavimentos industriais que sejam totalmente suportados pelo terreno subjacente ou por estacas têm seguido orientações baseadas no *Technical Report 34 – Concrete Industrial Ground Floors, A guide to design and construction* (Concrete Society, 2014), que daqui em diante será designado por TR 34. Este documento dá indicações relativas a diversos aspetos referentes às fases de conceção, construção e manutenção de pavimentos industriais.

De um modo geral, o TR 34 refere que os requisitos associados a pavimentos de betão devem incluir os seguintes aspetos:

- O pavimento deve apresentar condições que permitam usufruir do espaço industrial, pelo que é necessário garantir que não há um uso indevido ou uma imposição de cargas impróprias no mesmo e deve assumir-se um plano de operações de manutenção que permitam a permanência dessas condições ao longo do tempo;
- O pavimento deve ser capaz de suportar as cargas estáticas concentradas, uniformemente distribuídas e dinâmicas sem a ocorrência de deflexões, assentamentos ou danos nas juntas em proporções inaceitáveis;
- A disposição das juntas deve ter em conta a localização dos pés das estantes ou dos pilares dos pavimentos de *mezzanines*;
- As juntas e os reforços devem ser robustos e detalhados o suficiente de modo a minimizar o risco de fendilhação;
- A superfície do pavimento deve apresentar regularidade, resistência à abrasão, resistência química e características de rugosidade adequadas;
- O tipo de acabamento deve estar de acordo com aquele que foi estabelecido.

No presente capítulo serão abordados alguns aspetos a que o TR 34 faz referência para o desenvolvimento de um projeto de pavimentos industriais, em particular, aqueles que condicionam de alguma forma o desempenho dos mesmos.

3.2. REQUISITOS OPERACIONAIS

Atualmente, os pavilhões industriais com funções específicas para armazenamento apresentam algumas variantes, podendo encontrar-se situações de armazenamento por mero processo de empilhamento dos materiais (se eles assim o permitirem), por recurso ao uso de paletes e estantes, ou mesmo sistemas automatizados que estão aptos para gerir e transportar os produtos sem a necessidade de intervenção humana. No presente trabalho, o caso que se pretende estudar está mais direcionado para as soluções com estantes pelo que se torna fundamental apresentar o modo de funcionamento destas áreas e os equipamentos que são utilizados nas mesmas.

O recurso a estantes é, talvez, das soluções mais eficientes uma vez que se conseguem atingir alturas de armazenamento elevadas e o acesso aos diferentes tipos de produtos é mais fácil, atendendo a que existem equipamentos próprios para o transporte de mercadorias. No que diz respeito ao aproveitamento do espaço, a opção das estantes é eficaz mas não vai depender unicamente da área disponível propriamente dita. Os veículos e equipamentos utilizados são, nestes casos, altamente condicionantes uma vez que apresentam restrições operacionais associadas à sua área de movimento para efetuar as cargas e descargas e ao espaço que necessitam para se movimentar nos corredores e áreas transitáveis. Por estes motivos, é o tipo de equipamentos utilizados o fator mais condicionante relativamente ao aproveitamento do volume do edifício. Se um determinado equipamento não tiver capacidade de alcançar uma dada altura, apesar do volume do edifício o permitir, não vai ser possível tirar partido desse espaço; por outro lado, se um equipamento necessitar de uma determinada área para efetuar as manobras de carga e descarga, as medidas dos corredores entre estantes ficam automaticamente dependentes dessas restrições. Estes são apenas dois exemplos de situações que mostram a importância que tem a escolha dos equipamentos a utilizar nas áreas de armazenamento e, por isso, o TR 34 faz referência e descreve alguns tipos de equipamentos mais comuns utilizados neste tipo de ambientes, indicando também algumas recomendações que lhes estão associadas.

Dentro da vasta gama de equipamentos utilizados para este tipo de áreas, o veículo mais comum que se pode encontrar é o empilhador frontal, normalmente com pneus maciços largos. Este equipamento tem a função de transportar cargas desde os parques de descarga dos camiões até aos locais onde se pretende armazenar o produto, sendo apropriados para se movimentar dentro e fora de edifícios. Os empilhadores frontais podem ser utilizados para armazenamentos simples externos ou dentro de pavilhões com estantes e sistemas de paletes, e estão providos de um mastro telescópico que pode atingir uma altura máxima em torno de 7 m. Uma vez que a sua carga e descarga é realizada na zona à frente do eixo dianteiro, os corredores onde transitam os empilhadores frontais necessitam, geralmente, de uma largura de pelo menos 3 m para que seja possível executar as manobras necessárias. É importante também salientar que os pneus que normalmente se utilizam, maciços, podem ser agressivos em superfícies que estejam sujas ou molhadas pelo que se recomenda que sejam mantidos limpos os pavimentos por onde transitam estes equipamentos, de modo a evitar danos no pavimento. Um aspeto importante relativo aos empilhadores frontais é a sua capacidade de tolerarem superfícies relativamente irregulares e zonas de juntas, o que geralmente não acontece com outro tipo de equipamentos.

Um outro tipo de veículo que é bastante comum, também referido no TR 34, é o empilhador retrátil, que é apropriado para operações no interior dos pavilhões industriais. Este tipo de equipamento tem um mastro com um alcance em altura que atinge normalmente entre 10 a 12 m. Para operar, estes veí-

culos necessitam de corredores com uma largura de pelo menos 3 m. Estes equipamentos efetuam as operações de recolha ou depósito das mercadorias através desse mastro que se localiza à frente da cabina e tem a capacidade de se recolher quando o equipamento está em movimento. Normalmente, os empilhadores retráteis utilizam pneus de poliuretano que não é agressivo para as superfícies mas são muito resistentes e podem danificar as juntas, pelo que devem circular em pavimentos nivelados e regulares, de preferência sem juntas ou com juntas que não apresentem irregularidades ou criem algum tipo de descontinuidade no pavimento.

Normalmente, um dos objetivos principais que se pretende atingir quando se planeia a configuração dos espaços de armazenamento é maximizar o espaço útil, pelo que não é conveniente que os veículos de transporte necessitem de corredores largos uma vez que se desperdiça espaço onde se poderiam colocar estantes e aumentar a capacidade de armazenamento. Assim, existe um tipo de empilhadores especialmente concebidos para se movimentarem em corredores muito estreitos, designados por empilhadores VNA (*Very Narrow Aisles*). Estes equipamentos incorporam um mastro com a capacidade de rotação da carga a 90° em qualquer direção, circulam em corredores com larguras pouco maiores que as suas dimensões e, geralmente, movimentam-se ao longo dos corredores por meio de caminhos definidos. Assim, surge uma necessidade muito maior de controlar o nivelamento e regularidade do pavimento e possíveis juntas e de verificar as condições de cada um dos corredores onde é previsto que estes veículos tenham de circular. Para ajudar no controlo destas áreas muito específicas, o TR 34 distingue dois tipos de áreas que serão apresentadas mais à frente no presente capítulo e métodos concebidos com o propósito de controlar melhor estas áreas que necessitam de maior cuidado. Na Figura 15 estão apresentados exemplos dos veículos anteriormente descritos.



Figura 15 - Empilhadores tipo: a) frontal; b) retrátil; c) VNA (adaptado de <http://www.toyota-forklifts.com.pt>)

Um aspeto relevante relativo à utilização destes equipamentos, que atingem alturas elevadas, está associado ao problema que pode surgir devido à irregularidade da superfície quando estes estão a operar com o mastro telescópico estendido em alturas elevadas. O que pode acontecer é que, se o pavimento apresentar, por exemplo, um desnivelamento considerável, o equipamento, quando em serviço, pode sofrer inclinações (Figura 16) que podem levar à colisão do mesmo com outros equipamentos ou mesmo com as estantes e mercadorias que estiverem na sua envolvente. Para evitar estas situações, normalmente, o operador tende a diminuir a rapidez do veículo e das manobras que tem de realizar o que, de um ponto de vista geral, diminui a produtividade no espaço de armazenamento.

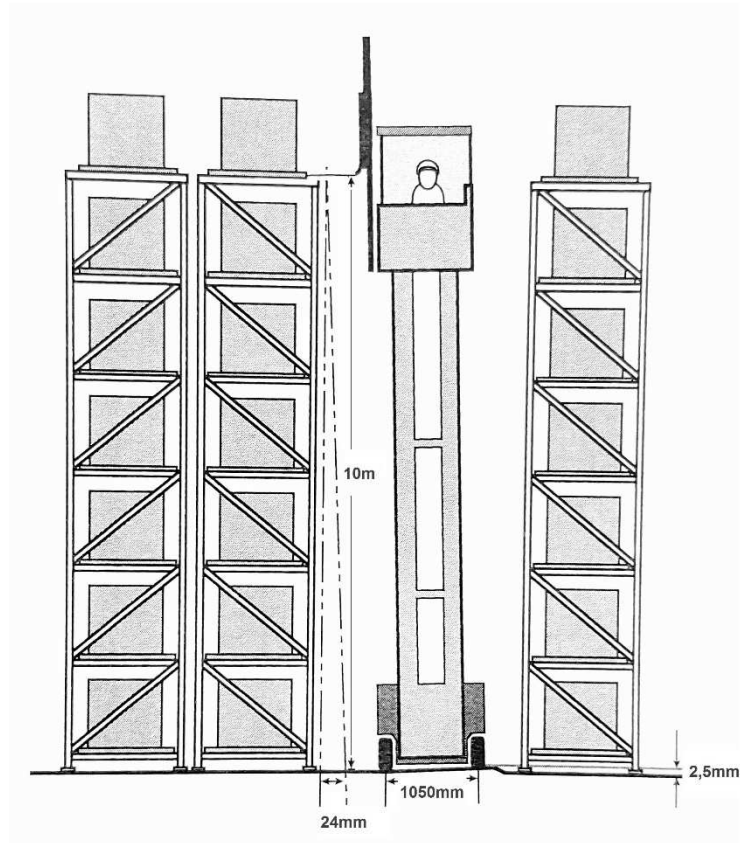


Figura 16 - Inclinação do equipamento devido a desnivelamento (adaptado de Concrete Society, 2014)

Os espaços de armazenamento, quando em fase de projeto, devem já ter previsto o tipo de equipamento que se vai utilizar para permitir que se tire o melhor partido do espaço disponível e se preparem as superfícies para o tipo de equipamento que vai circular sobre elas. Os veículos de transporte anteriormente descritos e as suas variantes existentes no mercado vão condicionar as características que se pretende obter num pavimento e os requisitos que lhes são exigidos.

3.3. REQUISITOS ESTRUTURAIS

Os pavimentos industriais apresentam um sistema estrutural que integra uma laje de betão na sua camada superior, normalmente reforçada com armaduras convencionais, fibras de aço ou outro tipo de reforço. Esta camada é aquela que apresenta um maior número de exigências a nível de conceção e construção pelo que é muito importante que se faça uma escolha correta do tipo de betão a utilizar nesta camada. A escolha errada do tipo de betão a aplicar ou o modo como a laje é construída é muitas vezes a razão pelo qual surgem problemas relacionados com o desempenho da superfície. Uma vez conhecidas essas condições, o método de dimensionamento da laje torna-se igualmente importante em todo o processo de conceção e construção desta camada superior do pavimento.

O dimensionamento da laje de betão considera que o peso próprio da laje, as sobrecargas aplicadas à mesma e os efeitos de retração e variações de temperatura são as ações principais a ser consideradas para efeitos de cálculo.

Um dos potenciais problemas que se pode verificar nos pavimentos industriais está relacionado com o gradiente de temperatura ao longo da espessura da laje de betão, existindo uma tendência para que a

parte exposta da camada seque mais rapidamente que a base, proporcionando o desenvolvimento de esforços de flexão que provocam deformações, em particular, nos cantos e nos limites da laje.

O TR 34, no que diz respeito às sobrecargas impostas ao pavimento, apresenta uma distinção entre sobrecargas devido a ações estáticas e a ações dinâmicas.

Nos pavilhões industriais de armazenamento podem identificar-se diferentes tipos de cargas estáticas: cargas concentradas, cargas uniformemente distribuídas e cargas lineares. As cargas concentradas são geralmente críticas para o desenvolvimento do projeto e resultam da ação das bases das estantes, de equipamentos fixos que transmitem o seu peso ao pavimento por meio de apoios singulares ou mesmo de cargas dos empilhadores (ação concentrada descarregada através dos pneus do equipamento). Quanto às cargas uniformemente distribuídas, estas podem ter origem em maquinarias e equipamentos fixos com bases amplas, em blocos de paletes empilhadas, ou qualquer tipo de equipamento que assente no pavimento numa área relativamente ampla. As cargas lineares, por sua vez, podem resultar de paredes divisórias ou equipamentos instalados sobre carris, entre outras.

As cargas dinâmicas estão, em geral, associadas à circulação dos equipamentos referidos anteriormente.

3.4. REQUISITOS DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO

Como já foi referido no ponto relativo aos requisitos operacionais, o tipo de equipamentos que circulem dentro das áreas de armazenamento é altamente condicionante no que diz respeito às características que a superfície dos pavimentos devem apresentar. Existem equipamentos capazes de tolerar algumas irregularidades mas a maioria necessita de condições muito rigorosas para que possam ser manobrados e operados em segurança e com a rapidez desejada.

Nesse sentido, o TR 34 apresenta dois critérios que devem ser analisados e o modo como os mesmos devem ser controlados.

3.4.1. PLANIMETRIA E NIVELAMENTO

É importante esclarecer a diferença estabelecida pelo TR 34 entre planimetria e nivelamento. Planimetria diz respeito à variação da regularidade da superfície em curtas distâncias enquanto o nivelamento diz respeito à variação de cotas em longas distâncias. Os valores de distâncias utilizados para controlar estas características da superfície são, para a planimetria, a partir de um ponto de referência, 0,6 m, e para o nivelamento, 3 m. Na Figura 17 apresenta-se um esquema que permite compreender a distinção feita entre estes dois parâmetros.

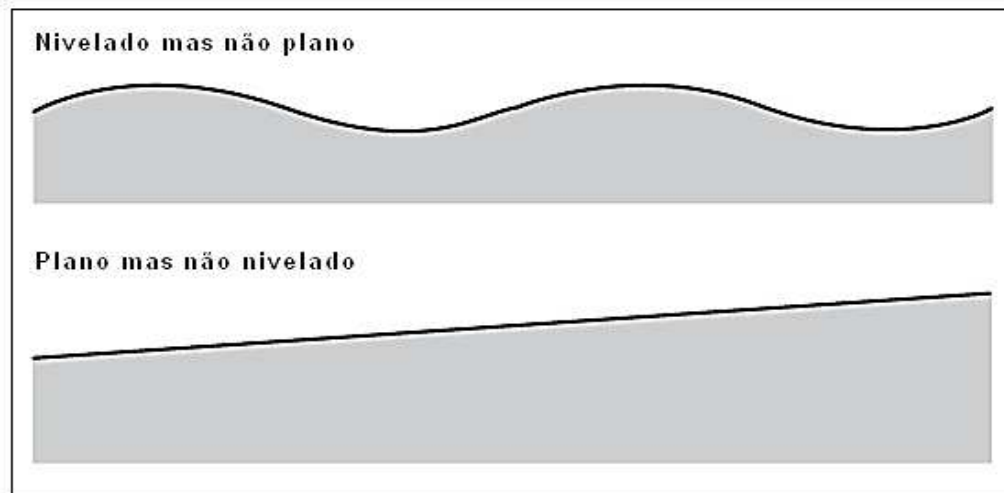


Figura 17 – Esquema elucidativo do Nivelamento e da Planimetria (adaptado de Concrete Society, 2014)

3.4.1.2. Áreas de movimento livre e áreas de movimento definido

Para compreender melhor o modo como o TR 34 sugere que se controlem determinadas propriedades devem ser introduzidas duas definições relativamente à funcionalidade dos espaços. Neste guia, é feita uma distinção entre áreas de movimento livre (*free-movement areas* – FM) e áreas de movimento definido (*defined-movement areas* – DM). As primeiras são definidas como áreas em que as máquinas e equipamentos se podem movimentar livremente em qualquer direção enquanto as segundas estão restritas a caminhos fixos. Nas Figura 18 e Figura 19 podem observar-se dois exemplos destes dois tipos de áreas.



Figura 18 - Áreas de movimento livre (FM) (adaptado de <http://www.trovan.com/Applications/warehousing.html>)



Figura 19 - Áreas de movimento definido (DM) (adaptado de http://www.wapshanghai.com/index.php?_m=mod_product&_a=view&p_id=174)

Consoante a função que uma determinada área desempenha dentro do espaço de armazenamento, poderão ser definidas, ou não, desde o início do projeto, as áreas de movimento livre e de movimento definido. Esse conhecimento prévio das condições de trabalho permite que se apliquem as medidas mais adequadas de tratamento do pavimento. Para garantir que os requisitos são cumpridos, existem parâmetros definidos pelo TR 34, descritos de seguida, que permitem avaliar a qualidade do pavimento construído.

- **Propriedades de controlo em áreas de movimento livre**

Quando se pretende analisar a qualidade das áreas de movimento livre são escolhidos determinados pontos representativos do pavimento para avaliação, uma vez que não seria possível testar toda a área desses espaços.

As propriedades medidas para a inspeção da regularidade do pavimento em áreas de movimento livre são definidas pelo TR 34 como a propriedade E e a propriedade F.

A propriedade E desempenha a função de controlar o nivelamento do pavimento, sendo efetuada a medida da diferença de elevação em milímetros diretamente entre pontos fixos distanciados de 3 m entre si. Esta medida é verificada em alinhamentos ortogonais entre si, como se indica na Figura 20. Quando se executa o controlo desta propriedade deve criar-se em todo o pavimento uma grelha de pontos espaçados de 3 m para que toda a superfície do pavimento seja inspecionada, sendo dispensadas de análise as zonas com uma distância menor ou igual a 1,5 m relativamente a locais onde se encontram paredes, pilares ou outro tipo de elementos estruturais.

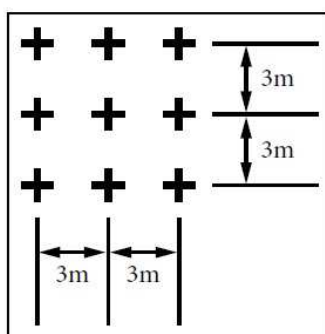


Figura 20 – Verificação da propriedade E, grelha de 3 metros (Concrete Society, 2014).

A propriedade F pretende controlar a planimetria do pavimento, verificando a alteração das inclinações entre alinhamentos definidos por pares de pontos afastados de 0,3 m. Em termos práticos, esta propriedade mede os assentamentos diferenciais numa distância pré-definida pelo TR 34, como se apresenta na Figura 21. A avaliação desta propriedade deve ser realizada ao longo de alinhamentos já definidos na grelha que se cria para a verificação da propriedade E, e deve ser executada num comprimento total em metros equivalente ao valor resultante da área total do pavimento em metros quadrados dividida por 10. Além disso, as verificações devem ser distribuídas uniformemente em secções pela área do pavimento, resultando em inspeções nas duas direções ortogonais com comprimentos totais iguais.

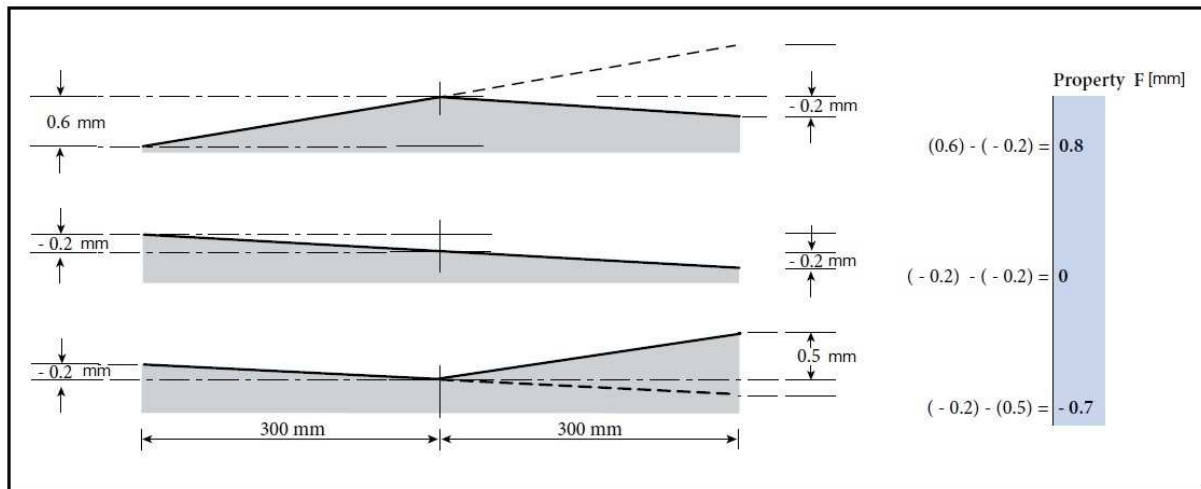


Figura 21 - Exemplos de cálculo da propriedade F (Concrete Society, 2014)

Para pavimentos novos a variação de altura de uma superfície analisada deve encontrar-se dentro dos limites de mais ou menos 15 mm relativamente a um plano de referência no qual tenha sido verificada a propriedade E.

Quando a análise da regularidade do pavimento é realizada nas áreas de movimento definido, geralmente associadas a corredores extremamente estreitos, é o desempenho dos equipamentos que irão circular nessas áreas que vai ser mais afetado caso não se atinjam os níveis de exigência requeridos. No caso de indefinição do tipo de áreas nos projetos de pavimentos industriais, consideram-se todas como áreas de movimento livre.

O TR 34 apresenta uma classificação para os pavimentos em função do seu tipo de utilização e limites para as propriedades de controlo para as respetivas classes. Na Tabela 3 podem verificar-se as classes existentes e os limites associados a cada uma delas. Nestas avaliações os limites impostos apresentam-se em função do percentil 95, isto é, há um limite superior para os valores das propriedades E e F, no presente caso, 95% dos casos devem apresentar valores inferiores aos indicados na tabela. Os locais de inspeção para as propriedades E e F devem ficar registados para o caso de ser necessário voltar a avaliar o comportamento do pavimento e poder comparar os valores obtidos.

O TR 34 recomenda, para garantir desempenhos satisfatórios durante a operação, que se classifiquem os novos pavimentos construídos na classe FM2. No que diz respeito à avaliação da superfície, esta é realizada com recurso a níveis precisos para controlar a propriedade E e a equipas de operadores e equipamentos digitais especializados para controlar a propriedade F.

Tabela 3 – Classes de pavimentos de áreas de movimento livre e valores dos percentis 95 permitidos para as propriedades E e F (adaptado de Concrete Society, 2014).

Classe do Pavimento	Utilização típica do pavimento	Propriedade	
		E[mm]	F[mm]
FM1	Onde os requisitos de nivelamento e planimetria são extremamente elevados. Máquinas de alcance operam a alturas superiores a 13 m sem mudança de direção.	4,5	1,8
FM2	Máquinas de alcance operam entre 8 a 13 m de altura sem mudança de direção.	6,5	2,0
FM3	Superfícies comerciais onde se aplica diretamente o pavimento. Máquinas de alcance operam até 8 m de altura sem mudança de sentido. Máquinas de alcance operam até 13 m de altura sem mudança de direção.	8,0	2,2
FM4	Superfícies comerciais onde se aplicam argamassas. Áreas comerciais e instalações fabris onde os equipamentos de transporte e manuseamento de mercadorias levantam mercadorias até 4 m de altura.	10,0	2,4

- **Propriedades de controlo em áreas de movimento definido**

O controlo da regularidade deste tipo de área deve ser realizado quando já está estabelecido o local em planta das áreas de movimento definido e é realizado apenas nos caminhos onde irão circular os equipamentos, uma vez que não se justificaria fazer o controlo nas áreas complementares.

Tal como para as áreas de movimento livre, também existem propriedades que devem ser medidas para permitir uma avaliação da regularidade do pavimento e uma classificação dos pavimentos em função da altura das estantes.

As propriedades definidas para a avaliação da regularidade dos pavimentos em áreas de movimento definido são a propriedade Z, X, Z_{SLOPE} , dZ, dX, d^2Z e d^2X . A propriedade Z corresponde à distância entre os pontos centrais das rodas dianteiras dos equipamentos, em metros. A propriedade X é definida pela distância entre o centro dos eixos dianteiro e traseiro dos equipamentos rolantes, em metros. A propriedade Z_{SLOPE} é a inclinação transversal do corredor entre os respetivos centros das rodas dianteiras do equipamento, em milímetros por metro. As propriedades dZ e dX são, respetivamente, a diferença de elevação, em milímetros, entre os centros das rodas dianteiras e a diferença de elevação, em milímetros, dos centros dos eixos dianteiro e traseiro. Por fim, as propriedades d^2Z e d^2X são a variação em dZ e dX, respetivamente, em milímetros, ao longo de um movimento de 300 mm no caminho definido para as rodas circularem.

Nas Figura 22, Figura 23 e Figura 24 apresentam-se esquematicamente as propriedades medidas, avaliadas nas áreas de movimento definido, e na Tabela 4 encontram-se definidos os limites permitidos para as mesmas.

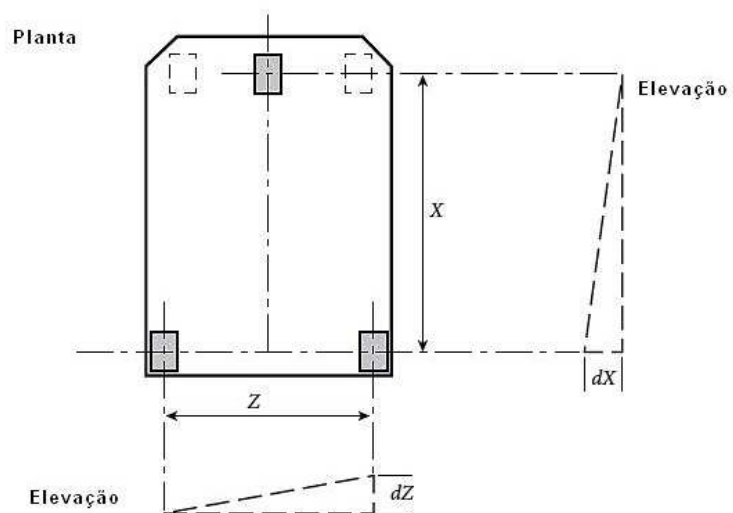


Figura 22 - Propriedades Z , X , dX e dZ (adaptado de Concrete Society, 2014)

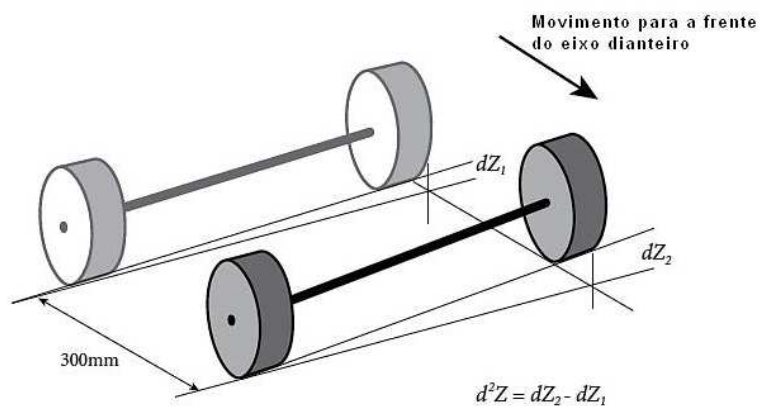


Figura 23 - Determinação de d^2Z . (adaptado de Concrete Society, 2014)

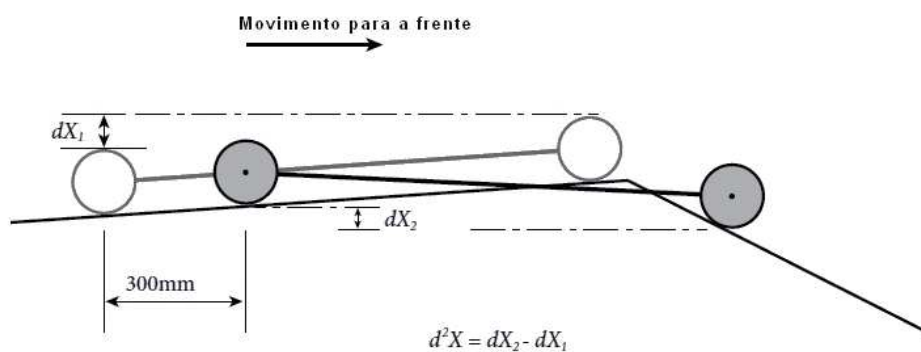


Figura 24 - Determinação de d^2X . (adaptado de Concrete Society, 2014)

Tabela 4- Classes de pavimento em áreas de movimento definido e limites permitidos para as propriedades dZ, dX, d²Z e d²X (adaptado de Concrete Society, 2014).

Classe do Pavimento	Altura do topo da viga da estante	Z_{SLOPE}	dZ	d ² Z	dX	d ² X
Cálculo	-	mm/m	$Z \times Z_{SLOPE}$	$dZ \times 0,75$	Valores fixos $2 \times Z_{SLOPE} \times 1,1$	Valores fixos
DM1	Acima de 13m	1,3	$Z \times 1,3$	$Z \times 1,0$	2,9	1,5
DM2	8-13m	2,0	$Z \times 2,0$	$Z \times 1,5$	4,4	2,0
DM3	Até 8m	2,5	$Z \times 2,5$	$Z \times 1,9$	5,5	2,5

A avaliação da superfície é realizada ao longo do caminho das rodas dos equipamentos começando com o eixo de carga no primeiro apoio da primeira estante de um corredor. As propriedades são medidas por equipamentos digitais especiais que registam os dados de modo contínuo ou semi-contínuo.

3.4.2. RESISTÊNCIA À ABRASÃO

No documento TR 34 é feita uma referência à resistência à abrasão que a superfície dos pavimentos deve apresentar. Esta característica traduz a capacidade que uma superfície apresenta para resistir ao desgaste causado pela fricção, movimento de rodados, deslizamento, corte e forças de impacto. Este processo ocorre através do deslocamento e remoção de partículas ou fragmentos da superfície, criando irregularidades que impedem o bom funcionamento do pavimento.

O processo abrasivo é complexo e pode resultar de situações diversas. O TR 34 faz referência a um teste que permite medir a resistência à abrasão de uma superfície de um pavimento. Esse teste é descrito na BS EN 13892-4:2002, *Methods of test for screed materials. Determination of Wear resistance – BCA* (BSI, 2002). O TR 34 indica que o mesmo deve ser executado quando o betão apresentar as condições de resistência requeridas, ou seja, pelo menos, 28 dias após a sua colocação. É sugerido também que se realize este teste uma vez por cada 4000 m², sendo que o registo máximo obtido no ensaio deve ser inferior a 0,20 mm.

Caso não se consigam encontrar as condições necessárias para a resistência à abrasão na superfície é sugerido que se faça a selagem por penetração de resinas e/ou se realize o polimento da superfície.

3.5. OUTROS REQUISITOS – PROSPEÇÃO GEOTÉCNICA

De acordo com o TR 34, as operações referentes à inspeção do solo devem seguir as indicações dadas pela BS NP EN 1997-1:2004, *Eurocode 7 – Geotechnical design – Part 1 General rules* (BSI, 2004) e é feita a recomendação de que deve ser um técnico qualificado o responsável pelo planeamento das operações a executar e pela interpretação dos respetivos resultados. Além disso, também é referido no documento que se devem realizar os ensaios apropriados para que todos os parâmetros relativos ao solo necessários para o projeto de dimensionamento da laje sejam determinados.

Para o caso particular de pavimentos suportados unicamente pelo solo, que é o caso de estudo do presente trabalho, o TR 34 refere que no projeto seja medido o módulo de reação k na camada de base através do ensaio de carga em placa (PLT). Para o procedimento desse ensaio, devem ser seguidas as indicações referidas na BS NP EN 1997-2:2007 *Eurocode 7 – Geotechnical design – Ground investigation and testing* (BSI, 2007).

Segundo o TR 34, quanto maior for o diâmetro da placa utilizada no ensaio, maior é a representatividade que se obtém nos resultados do ensaio PLT. Por este motivo, é sugerido pelo referido documento que se dê preferência à realização do ensaio com uma placa de 750 mm de diâmetro, caso contrário, será necessário aplicar fatores de conversão para obter os resultados pretendidos. Além disso, o documento também estabelece que o ensaio de carga deve ser realizado com uma placa que tenha no mínimo 300 mm de diâmetro e refere que a leitura dos valores de k deve ser feita quando se atinge um assentamento de 1,25 mm.

Geralmente, estes ensaios devem ser executados com uma frequência mínima de um ensaio por cada 2000 m² de área de pavimento.

4

CASO DE ESTUDO

4.1. INTRODUÇÃO

Na presente dissertação pretende-se realizar um estudo sobre o comportamento estrutural de um pavimento industrial quando submetido aos carregamentos típicos a que estas estruturas estão sujeitas e verificar qual o efeito da variação das espessuras das camadas do pavimento nesse comportamento. Serão considerados os requisitos estabelecidos no TR 34 e serão avaliados os custos associados às soluções estudadas.

Uma vez que existem muitos tipos de atividades em pavilhões industriais, como já foi referido anteriormente no capítulo 2, esta dissertação irá incidir nos casos de áreas logísticas, caracterizadas especialmente pelo armazenamento de mercadorias em estantes e pelo movimento de equipamentos especializados para essas áreas.

Para a realização das análises referidas foi necessário recorrer a um *software* adequado ao tratamento de problemas na área da geotecnia e que permitisse uma modelação tridimensional. Para o efeito foi selecionado o programa Midas GTS NX.

No presente capítulo é feita uma apresentação do referido programa e descreve-se de forma detalhada o projeto em estudo, especificando, nomeadamente, os materiais considerados, a geometria do modelo e as diferentes solicitações.

4.2. PROGRAMA MIDAS GTS NX

O Midas GTS NX é um programa relativamente recente no mercado, em particular, na Europa, e foi recentemente adicionado ao conjunto de *software* que a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto disponibiliza aos seus estudantes. Existindo um acordo com representantes da empresa *Midas IT* em Espanha, foi possível realizar as análises previstas para o presente trabalho recorrendo ao programa referido.

O *software* Midas GTS NX é um programa de análise tridimensional de elementos finitos que se foca especialmente na área de problemas geotécnicos e túneis (*GTS – Geotechnical & Tunnel analysis System*). O Midas GTS NX permite simular diferentes e consecutivas fases de construção. Esta capacidade é fundamental para conseguir executar de forma correta as análises pretendidas, podendo ser definidas em cada fase de construção as condições encontradas no cenário em análise. Em termos concretos das análises efetuadas, foi fundamental estabelecer, por exemplo, o estado de tensão inicial associado ao peso próprio do terreno e das camadas construídas, anulando os deslocamentos que daí decorrem. Deste modo, quando se procede à análise estrutural relativa ao efeito das solicitações exteriores,

os efeitos verificados no pavimento a nível de assentamentos são apenas decorrentes das solicitações que lhe são impostas, e não de qualquer fase anterior gerada no modelo. É de notar que a licença do *software* utilizada apenas permite que haja 10 estágios de construção em análise, pelo que esse facto teve de ser considerado na modelação.

4.3. GEOMETRIA DOS TERRENOS DE FUNDAÇÃO E DAS CAMADAS DE PAVIMENTO

Para a realização do estudo recorreu-se à análise de um projeto disponibilizado pela AdF-Geo. Trata-se de um projeto de construção de um pavimento de um edifício industrial, a ser implantado num terreno que foi caracterizado em termos geotécnicos.

Nos relatórios a que se teve acesso foi possível obter informação relativa a alguns parâmetros e aspetos construtivos que estavam definidos e que foram considerados no decorrer das análises do presente trabalho.

Um dos relatórios analisados foi o de reconhecimento geológico-geotécnico, a partir do qual foi possível verificar quais os ensaios realizados para estudar e compreender a estratigrafia e propriedades do terreno. Ao longo da análise do relatório verificou-se que os ensaios que inicialmente tinham sido previstos foram alterados, adaptando o planeado ao que se encontrou de facto no terreno. Assim, foram executados os seguintes ensaios:

- 4 sondagens à rotação, com profundidades que variam entre 19,5 e 21 m, num total de 82,5 m;
- 55 ensaios SPT, realizados em solos e em rochas brandas;
- medições dos níveis de água nos furos das sondagens;
- 3 ensaios penetrométricos dinâmicos super-pesados (DPSH).

Inicialmente tinha-se previsto a execução de 7 sondagens mecânicas à rotação. Contudo, devido à profundidade atingida pelas primeiras sondagens (superior a 19,5 m), e após a visita ao local, foram substituídas 3 sondagens por ensaios *in situ* DPSH, a partir dos quais se recolheram mais parâmetros geotécnicos.

Como resultado da combinação dos elementos obtidos em todos os estudos realizados foi possível definir a estratigrafia do terreno e a partir da mesma definiram-se os limites entre os horizontes utilizados para o modelo de cálculo.

Com base nas sondagens realizadas foram estabelecidos os seguintes horizontes geotécnicos:

G5 – Aterros e solos orgânicos

Em todas as sondagens realizadas foi verificada a existência de aterros heterogéneos compostos por solos orgânicos, de diversas origens, e solos areno-argilosos de fraca resistência que apresentavam espessuras pouco superiores a 1 m. Uma vez analisado o comportamento geomecânico deste horizonte superficial foi possível concluir que seria adequado agrupar os materiais encontrados num só horizonte.

G4 – Solo residual granítico pouco compacto (SPT<15)

Com espessuras que variam entre 2,0 e 5,5 m, abaixo do horizonte G5, foram detetados solos residuais graníticos sob a forma de material caulinzado, resultante dos processos de meteorização do maciço rochoso. Este horizonte apresentou resultados nos ensaios SPT e DPSH que permitiram concluir que a referida camada incorpora um solo pouco compacto.

G3 – Solo residual granítico medianamente compacto (SPT>15)

Apesar de constituir ainda solo residual granítico foi necessário definir um diferente horizonte geotécnico para a camada abaixo da anteriormente referida. O solo encontrado em profundidades que variam entre 5,7 e 12 m apresentou resultados nos ensaios SPT e DPSH que permitiram distinguir esta camada como sendo constituída por material mais competente, considerando-se assim um solo medianamente compacto.

G2 – Solo residual granítico compacto a muito compacto (SPT>30)

Abaixo do horizonte G3 foi detetado um horizonte com características de um solo residual granítico compacto a muito compacto na base.

G1 – Maciço granítico decomposto (SPT>60)

Sob todos os estratos acima descritos foi detetado um maciço granítico, pontualmente decomposto, de grão médio, que atingiu nos ensaios realizados consecutivas “negas” simples. No capítulo 2 é referido que quando num ensaio SPT se atingem 60 pancadas na primeira fase ou o mesmo número de pancadas na segunda fase de cravação, sem ultrapassar 30 cm de perfuração, o ensaio deverá ser interrompido e é registada a profundidade de penetração obtida. No caso do presente horizonte, este resultado foi obtido consecutivamente na última fase, ou seja, nos últimos 15 cm, com valores médios de penetração da ordem dos 25 cm (considerando que a profundidade de penetração é medida a partir da segunda fase, ou seja, não se consideram os primeiros 15 cm penetrados).

No relatório de reconhecimento geológico-geotécnico foram definidos, considerando os resultados de todos os ensaios executados, os intervalos de cotas dos diferentes horizontes. Para o desenvolvimento da análise do caso de estudo consideraram-se as espessuras de cada horizonte apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Intervalo de cotas e espessura dos horizontes do maciço de fundação

Horizontes Geotécnicos	Cotas		Espessura (m)
	Topo (m)	Base (m)	
G4	100,17	96,52	3,65
G3	96,52	91,97	4,55
G2	91,97	83,02	8,95
G1	83,02	68,02	15,00

Com base nos dados recolhidos em campo, e após a respetiva análise, foi indicado no relatório que apenas se deveria utilizar os horizontes G1, G2 e G3 para os apoios das fundações da estrutura do armazém. Estas recomendações devem-se ao facto de que uma vez analisados os horizontes definidos se pode verificar que apenas aqueles apresentavam características competentes para suportar o tipo de fundações em causa. Além disso, foi também indicado no relatório que se deverá proceder ao saneamento de todo o horizonte G5, por questões de heterogeneidade, podendo ser utilizado o horizonte G4 como nível de fundação do pavimento.

A solução proposta inicialmente para a estrutura do pavimento contempla as seguintes camadas, a partir da superfície:

- Laje de betão armado com fibras com 0,18 m de espessura;
- Camada superior de agregado britado de granulometria extensa (ABGE) com 0,15 m de espessura (base);

- Camada inferior de agregado britado de granulometria extensa (ABGE) com 0,20 m de espessura (sub-base).

No modelo criado no Midas GTS NX, além da definição da estratigrafia em profundidade, foi necessário estabelecer limites em planta para a modelação do pavimento. Uma vez que a análise do caso de estudo refere-se a uma área representativa de qualquer parte do pavimento industrial, as dimensões que o modelo apresenta apenas necessitam de ser suficientemente grandes para que as análises não fiquem comprometidas pelas condições de fronteira. Assim, definiu-se uma área de $30,5 \times 30,8 \text{ m}^2$.

Na Figura 25 apresenta-se uma representação bidimensional da geometria inicial utilizada no modelo numérico.

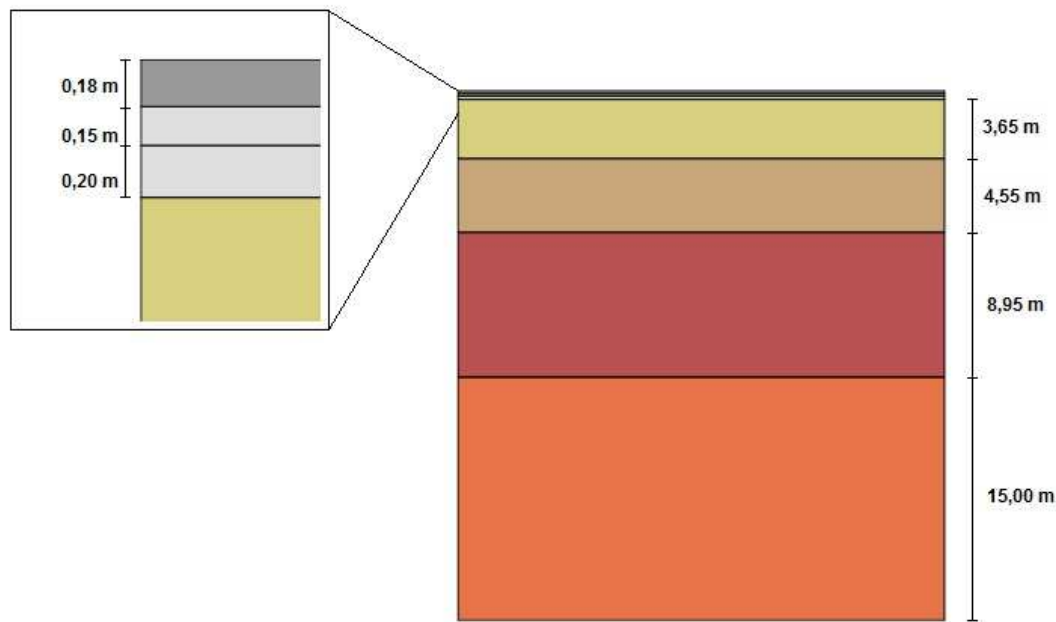


Figura 25 - Representação bidimensional da geometria do terreno e pavimento

4.4. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Em função dos estudos geotécnicos realizados foi possível atribuir aos materiais de fundação as características que se apresentam na Tabela 6.

Quanto aos materiais utilizados no pavimento, segundo a solução apresentada no projeto estudado, há duas camadas de ABGE e uma de betão. No que diz respeito às características associadas às camadas de ABGE, as mesmas são também apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros geotécnicos

Horizonte Geotécnico	Formação	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c' (kPa)	E(MPa)	Coefficiente de Poisson
	Tout-venant	20	35	0	70	0,3
G4	Solo residual granítico pouco compacto	19	30	5	20	0,3
G3	Solo residual granítico medianamente compacto	19	32	10	30	0,3
G2	Solo residual compacto a muito compacto	20	35	10	45	0,3
G1	Maciço granítico decomposto	20	38	10	60	0,3

O tipo de betão utilizado para a construção do pavimento, segundo especificações definidas em projeto, corresponde à classe de resistência C25/30, classe de exposição XC2 e classe estrutural S4. A classe de resistência e a classe estrutural são definidas segundo a NP EN 1992-1-1:2010, Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios (IPQ, 2010), onde é estabelecida uma classificação estrutural definida com base no tempo de vida útil do projeto, que neste caso se enquadra num horizonte de 50 anos. Segundo o anexo nacional da referida norma, um projeto com esse tempo de vida útil deve ser classificado como S4. A classificação referente à classe de exposição foi designada de acordo com a NP EN 206-1:2007, Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade (IPQ, 2007). No caso do betão foram consideradas as características apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades do betão C25/30 utilizadas na modelação numérica

Propriedade	
Módulo de elasticidade	31 GPa
Coefficiente de Poisson	0,2
Peso volúmico	25 kN/m ³

No que se refere aos solos e ao ABGE considerou-se um comportamento isotrópico e o critério de rotura de *Mohr-Coulomb*. Para o betão considerou-se um comportamento elástico.

A partir da análise dos resultados dos ensaios de caracterização do maciço concluiu-se que o valor mais elevado do nível freático se encontrava à cota 99,4 m.

4.5. SOLICITAÇÕES NO PAVIMENTO

De acordo com a documentação analisada foi possível definir valores que representam as sobrecargas que é necessário contabilizar no âmbito do funcionamento de um pavilhão de armazenamento, nomeadamente como o que se apresenta neste caso. Na Tabela 8 apresentam-se os valores das sobrecargas considerados nas análises processadas no programa Midas GTS NX.

Tabela 8 - Tipos e magnitude das sobrecargas

Tipo de Sobrecarga	Valor	Unidade
Uniformemente distribuída	40	kN/m ²
Provocada pela base da estante	60	kN/Pé de estante
Provocada pelo eixo dianteiro do empilhador	80	kN

A sobrecarga uniformemente distribuída é apenas considerada 28 dias após a construção do pavimento, uma vez que se trata de solicitações representativas de cargas resultantes do funcionamento diário do armazém e não relativas à construção do pavimento propriamente dito.

No que se refere às cargas concentradas, transmitidas pelos apoios das estantes, elas são consideradas ao longo de alinhamentos definidos pela disposição das estantes em corredores. Usualmente essa disposição é definida no projeto de arquitetura. Na Figura 26 é apresentado um esquema da disposição das estantes na área de armazenamento que foi estudada.

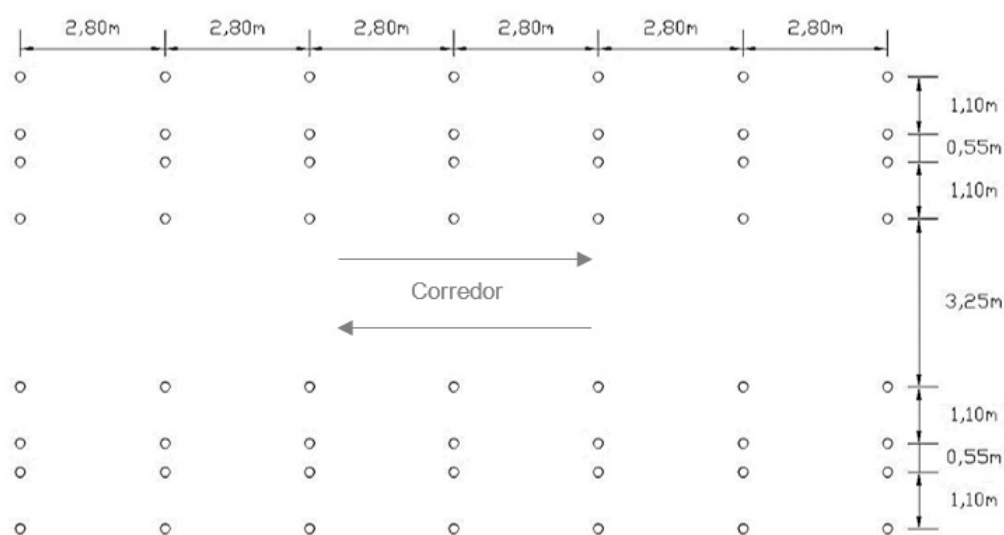


Figura 26 - Disposição das estantes na área de armazenamento

Por motivos relacionados com limitações do programa, foi necessário simplificar os apoios das estantes que se encontram de costas voltadas, suprimindo o espaço entre as mesmas, passando a ser esses apoios representados por um único ponto que acumula o valor das cargas de cada dois pés de estante contíguos. Assim, resultou uma configuração da disposição das cargas concentradas como mostra a Figura 27.

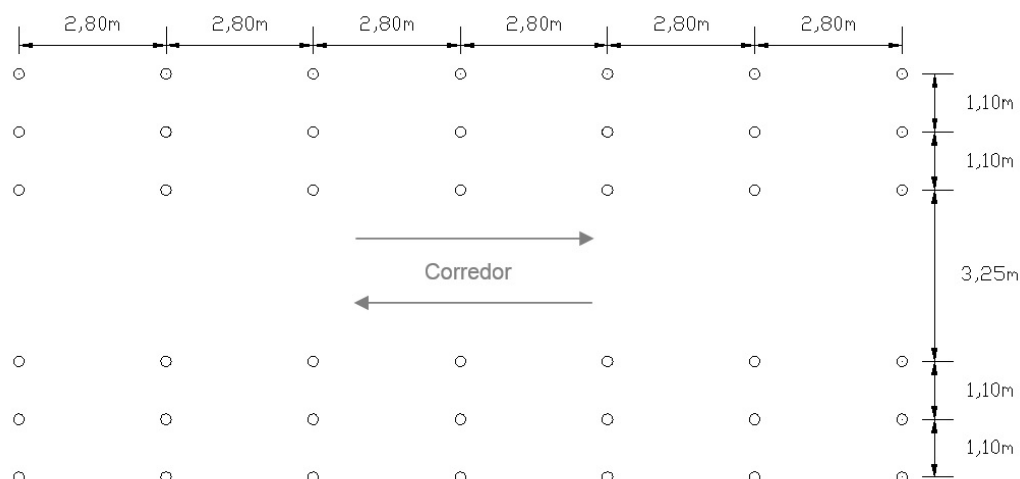


Figura 27 - Disposição das estantes no modelo de cálculo

No que concerne às cargas móveis provocadas pelo movimento dos equipamentos rolantes, a sua consideração teve por base a indicação dada no relatório do projeto, considerando que a sobrecarga é descarregada através do eixo dianteiro dos equipamentos e distribui-se pelos 2 pneus de igual forma, com uma distância de 1,05 m entre si. Quanto à área de contacto dos pneus, uma vez que não é especificado no projeto o equipamento com todas as suas características, através da NP EN 1991-1-1:2009, Eurocodódigo 1 – Acções em estruturas - Parte 1-1: Acções gerais - Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios (IPQ, 2009), foi possível considerar uma área de $0,20 \times 0,20 \text{ m}^2$. Estas dimensões são definidas na referida norma, no anexo nacional, correspondendo à área carregada por pneu de um empilhador (Figura 28).

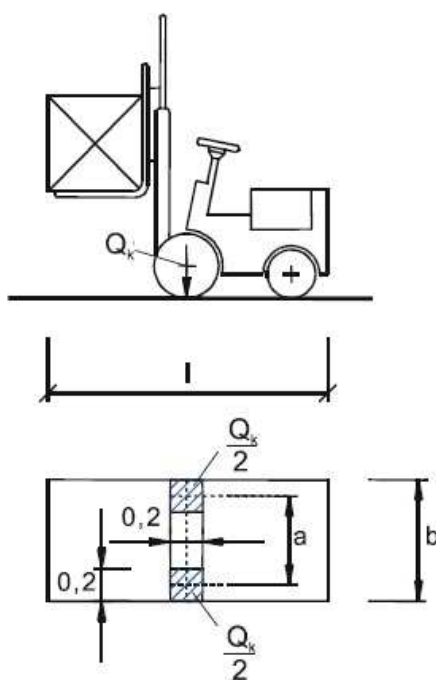


Figura 28 - Dimensões dos empilhadores (IPQ, 2009)

Para a representação destas cargas no modelo, e uma vez que as velocidades atingidas pelos empilhadores são relativamente baixas, não provocando efeitos dinâmicos relevantes no pavimento, considerou-se que seria adequado aplicar um par de cargas distribuídas, representativas das cargas dos pneus dianteiros. Essas cargas foram aplicadas a 2,8 m de distância relativamente ao limite do modelo, na direção paralela aos corredores. Foi definido que o carregamento a avaliar se reduz a 0,20 m (comprimento considerado para a representação da carga do pneu) uma vez que se admite que o efeito do mesmo vai ser igual em qualquer parte do pavimento que seja avaliada com as solicitações referidas. Assim, a verificação do efeito das cargas descarregadas através da área de contacto dos pneus traduz o efeito geral que decorre de cargas rolantes.

4.6. MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Para a definição da malha de elementos finitos tirou-se partido da disponibilidade que o programa apresenta de criar automaticamente malhas que consideram condições impostas pelo utilizador, como a criação de geometrias específicas ou elementos com dimensões pré-definidas.

É importante salientar que a definição da configuração da malha considerou a necessidade de aplicar no modelo cargas concentradas e cargas rolantes. No primeiro caso foram criados elementos na malha que incorporassem nós correspondentes aos pontos onde as bases das estantes transmitem as cargas ao pavimento para que no modelo se conseguissem aplicar essas cargas nos locais corretos, segundo a disposição definida na Figura 27. No segundo caso considerou-se que as cargas rolantes se moviam no centro dos corredores e os pontos de aplicação das cargas referentes aos pneus do equipamento seriam estabelecidos, de acordo com o que foi referido, numa área de pneu correspondente a $0,20 \times 0,20 \text{ m}^2$, considerando uma largura de 1,05 m entre pneus (dados relativos ao equipamento definido em projeto), resultando assim a inserção de nós nos locais respetivos da malha, considerando elementos com dimensões definidas.

Em termos de condições de fronteira do modelo (Figura 29), considerou-se que estavam impedidos os deslocamentos horizontais dos nós dos planos verticais, na direção perpendicular a cada um desses planos. Nos nós da base do modelo foram impedidos os deslocamentos nas três direções ortogonais.

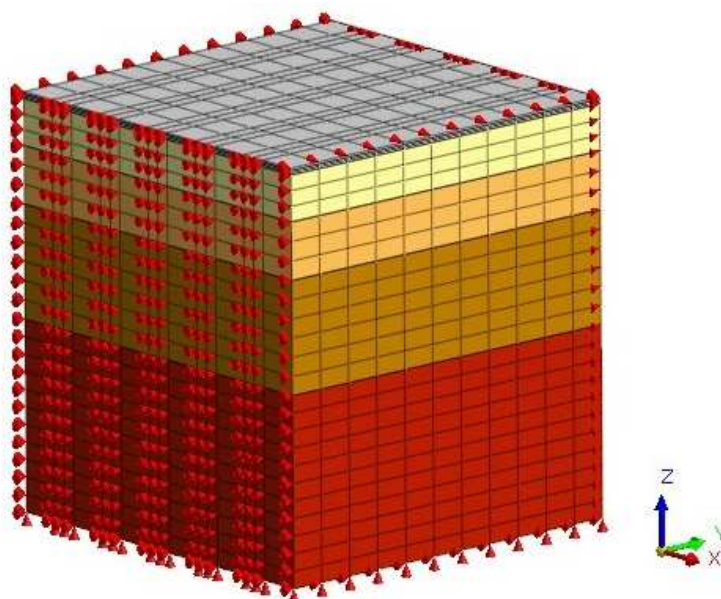


Figura 29 - Representação tridimensional das condições fronteira (5508 nós, 4576 elementos)

5

ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da modelação descrita no capítulo anterior, criada através do programa Midas GTS NX.

As análises realizadas focam-se nos pavimentos industriais, em particular, no caso de uma área de armazenamento com estantes. Foi efetuado o estudo de um projeto que é constituído por um pavimento construído diretamente sobre o solo e depois estudou-se qual o efeito da variação das espessuras das camadas do pavimento em termos de desempenho do mesmo e custo de construção.

Consideram-se cargas distribuídas, cargas concentradas e cargas rolantes. Deve salientar-se que dentro dos casos de carga a estudar, inicialmente, colocou-se a hipótese de estudar também um caso de cargas concentradas alternadas ao longo das estantes. Pretendia-se avaliar qual o efeito no solo e no pavimento de existirem mercadorias colocadas alternadamente nas estantes. Contudo, após verificar como se iriam distribuir as cargas nessa situação, foi possível concluir que este caso de análise não passaria de uma situação de efeito equivalente à de análise de cargas decorrente do carregamento total das estantes, mas numa escala menor.

Uma vez que as cargas devidas aos pés das estantes se distribuem segundo a disposição apresentada no capítulo anterior, simulou-se a seguinte situação de carregamento, esquematizada na Figura 30.

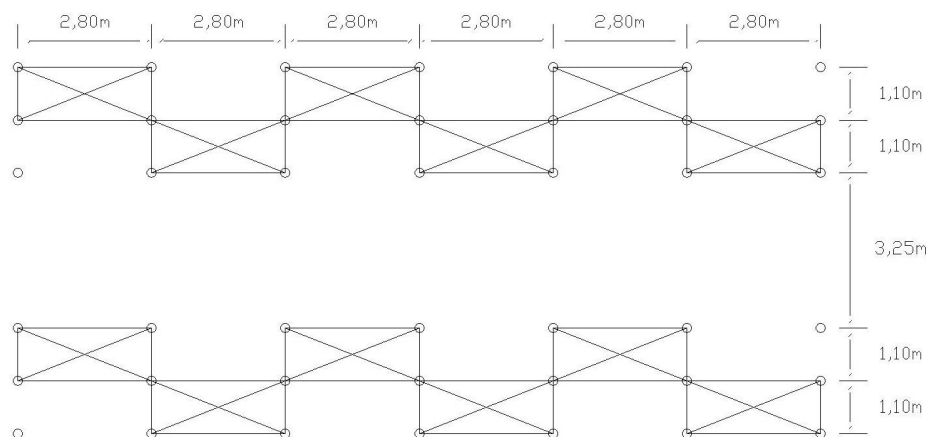


Figura 30 - Esquema representativo do carregamento alternado de estantes

Uma vez analisada a disposição dos pés das estantes e tendo conhecimento de que o caso de análise de cargas concentradas devido ao carregamento total das estantes correspondente a uma situação de total ocupação do espaço de armazenamento, em que cada pé de estante sofre a ação de uma carga de 60kN e o central de 120 kN, o valor de carga que equivale a ter metade do espaço ocupado corresponde a 30 kN por pé de estante ocupada. Assim, aplicou-se 30 kN nas partes ocupadas das estantes, tendo sempre em consideração que o ponto central das mesmas equivale a dois pés de estante, resultando, como se pode verificar no esquema da Figura 31, numa situação similar à análise de cargas concentradas com estantes totalmente carregadas, mas com um valor menor. Uma vez que a configuração dos pés das estantes mostra que para dois setores seguidos ao longo de uma estante existe a partilha de dois pés na sua base, quando se simula a situação de cargas alternadas nas estantes, resulta uma distribuição de cargas igual à situação de total armazenamento.

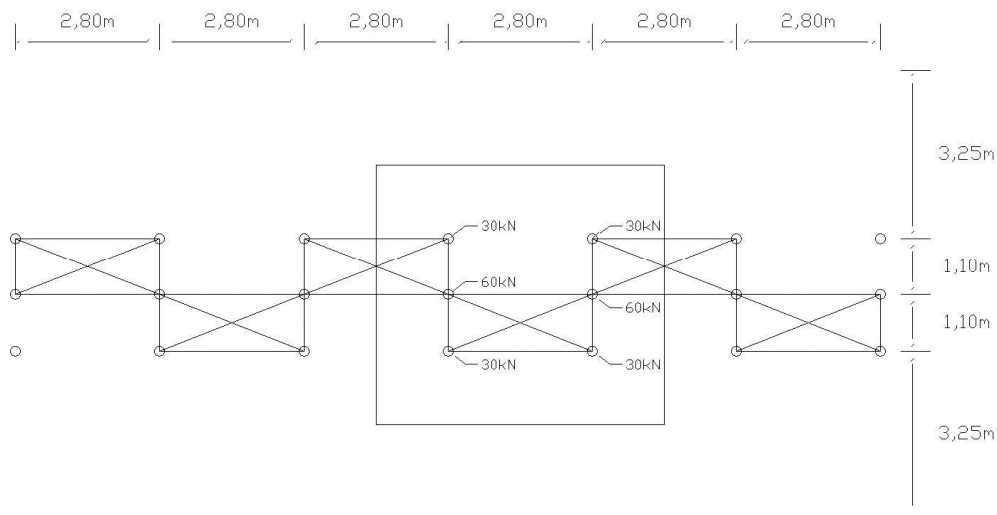


Figura 31 - Esquema representativo do carregamento alternado e respetivas cargas

Uma vez que os requisitos impostos pelo TR 34 estão associados essencialmente a assentamentos diferenciais, as análises realizadas focaram-se nos efeitos a nível de deformações no solo e as verificações feitas para todas as variações criadas no modelo foram avaliadas segundo os termos impostos por esse documento. O objetivo foi verificar a relação que existe entre a variação das espessuras das diferentes camadas e os efeitos repercutidos no pavimento devido a essas variações.

Em simultâneo, quando se verificou o estado de deformação do pavimento, realizaram-se análises relativas ao estado de tensão do solo de fundação. Para cada caso de estudo verificaram-se os valores do fator de segurança obtido para uma análise de tensões com base no critério de rotura de *Mohr Coulomb*, em particular, para a camada de solo de fundação, o horizonte G4.

Esse critério de rotura assenta na seguinte relação:

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \phi \quad (3)$$

em que:

- τ_f é a componente tangencial da tensão de rotura,
- c é a coesão,
- σ_f é a componente normal da tensão de rotura,
- ϕ é o ângulo de atrito ou ângulo de resistência ao corte.

Em termos práticos, foram considerados diferentes valores adequados para fatores de segurança relativos aos diferentes tipos de carga, nomeadamente, 2,0 para cargas cíclicas (eixos de carga de equipamentos) e 1,4-1,5 para cargas estáticas (distribuídas ou concentradas).

Avaliou-se ainda a variação do custo de construção das soluções testadas, em particular associado à variação das espessuras das camadas da estrutura do pavimento.

5.2. ANÁLISE DE RESULTADOS PARA O PAVIMENTO PROPOSTO NO PROJETO

5.2.1. ANÁLISE DE CARGA DISTRIBUÍDA

A análise do caso de carga distribuída pretende avaliar o efeito de ações impostas ao longo de todo o pavimento, consideradas com o valor de 40 kN/m^2 . Em consequência desta solicitação, a estrutura solo-pavimento sofre, na superfície, um deslocamento vertical uniforme (como seria espectável em função do tipo de carregamento aplicado e das condições de fronteira) com um valor de 23 mm (Figura 32).

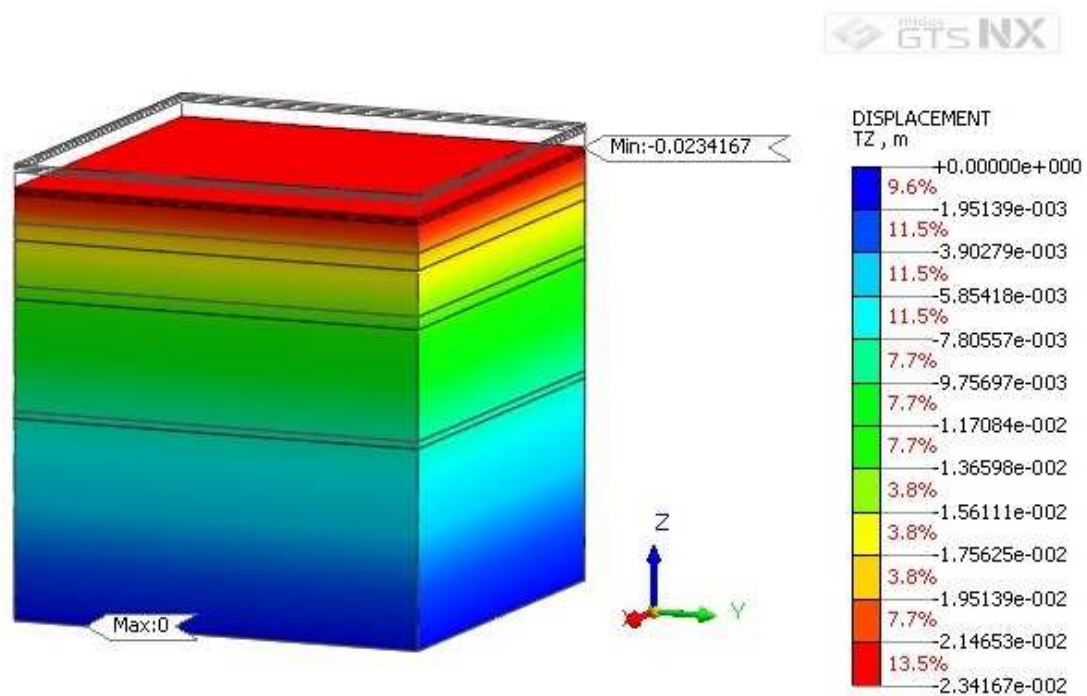


Figura 32 - Representação tridimensional de deslocamentos verticais devido ao carregamento de 40 kN/m^2

A avaliação dos deslocamentos verticais num alinhamento reto na direção x do modelo (Figura 33) comprova isso mesmo, não havendo lugar a qualquer verificação, pois de acordo com o TR 34 não está estabelecido um valor máximo de assentamento.

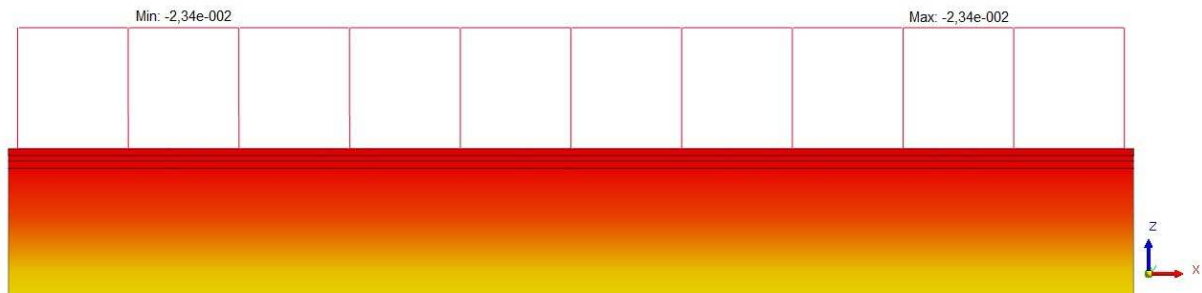


Figura 33 - Representação de deslocamentos verticais num alinhamento devido ao carregamento de 40kN/m²

Na sequência, foi realizada a verificação do estado de tensão da camada subjacente ao pavimento. Essa análise, como já foi referido, foi efetuada com base na verificação dos valores do fator de segurança obtidos a partir do programa calculados com base no critério de rotura de *Mohr-Coulomb*. Na Figura 34 apresenta-se um gráfico com escalas de cores que permite verificar os valores do fator de segurança na camada G4 do modelo.

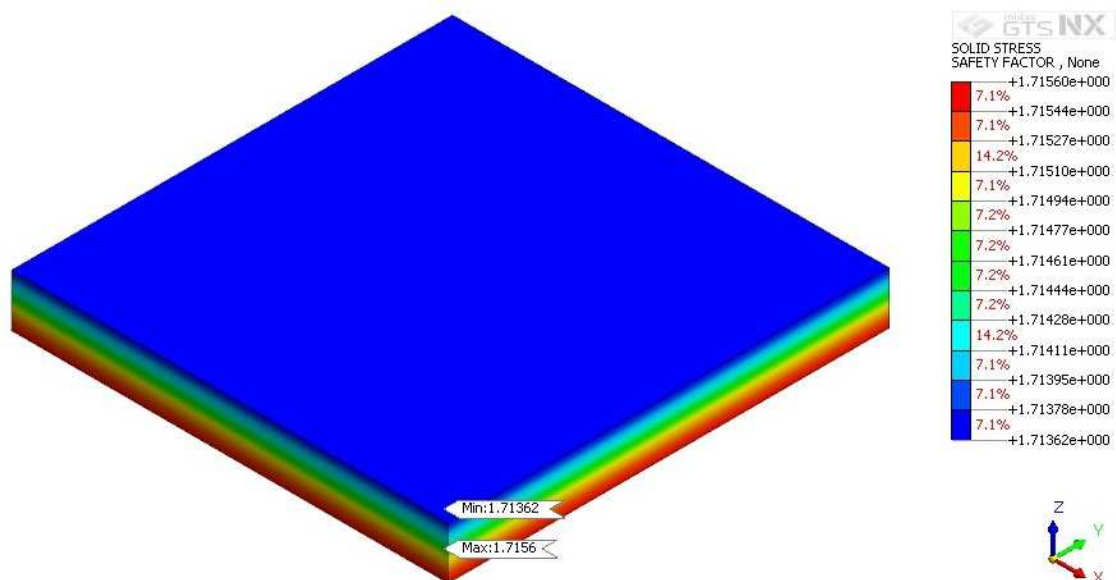


Figura 34 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação de carga distribuída

Pela análise do gráfico com escala de cores verifica-se que o fator de segurança na camada do solo de fundação assume um valor da ordem de 1,7 o que se enquadra nos valores adequados para o caso de cargas estáticas, neste caso uma carga distribuída.

De forma a confirmar a adequada utilização do programa de cálculo, calcularam-se à mão os valores da tensão vertical no terreno, associados à carga geostática (considerando a estratigrafia do terreno, as propriedades dos materiais e a existência de água à cota 99,4 m, de acordo com o que foi introduzido no programa), e compararam-se com os valores fornecidos pelo programa.

Os valores da tensão obtidos na base do modelo foram de 666 kPa e 677,5 kPa, antes e depois de construir as camadas de pavimento, respetivamente. Após a aplicação da carga distribuída obtém-se um valor de 717,5 kPa.

Na Tabela 9 apresentam-se os valores das tensões totais obtidos através do programa. Pode verificar-se que estes valores são semelhantes aos calculados.

Tabela 9 - Tensões totais

Fase de construção (<i>Stages</i>)	Tensão total [kPa]
Estado inicial	-659
Construção do pavimento	-670
Aplicação da carga distribuída	-710

5.2.2. ANÁLISE DE CARGAS CONCENTRADAS – CARREGAMENTO TOTAL

Como já foi referido no capítulo anterior, para a análise de cargas concentradas, foi necessário ter em conta a disposição das estantes no pavimento. Após a introdução desses dados foi possível avaliar o efeito das cargas concentradas, de 60 kN/pé de estante. Na Figura 35 apresenta-se a configuração do carregamento aplicado no modelo e pode verificar-se que foi simulada uma área de armazenamento com 5 pares de estantes (1,10 m cada estante) totalmente carregadas.

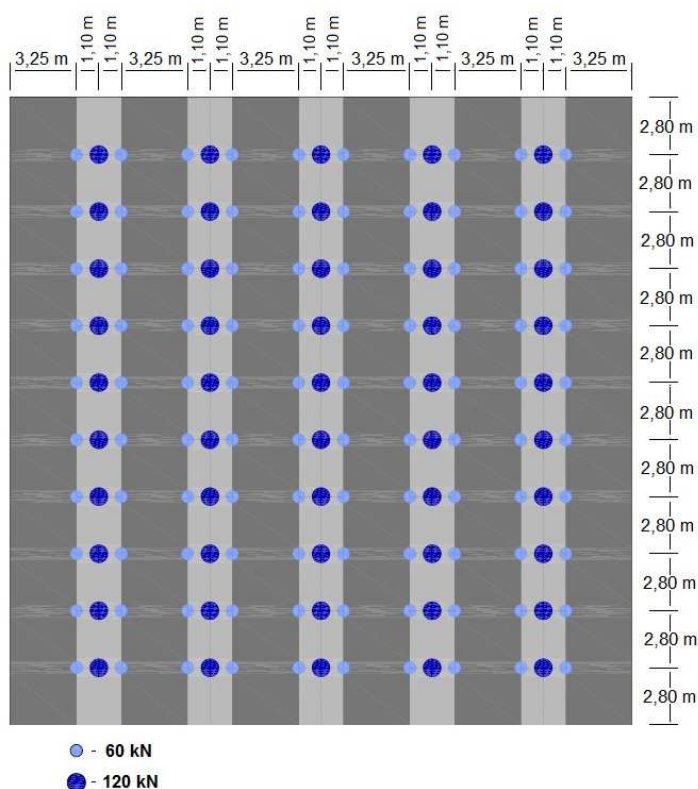


Figura 35 - Configuração de cargas concentradas no modelo

Inicialmente, realizou-se uma análise do pavimento relativamente aos deslocamentos verticais que este apresenta perante as solicitações impostas devido às estantes quando as mesmas estão todas carregadas. Na Figura 36 apresenta-se o gráfico dos deslocamentos verticais resultantes dessas ações ao longo de um alinhamento centrado no modelo, que corta o pavimento na direção perpendicular aos corredores.

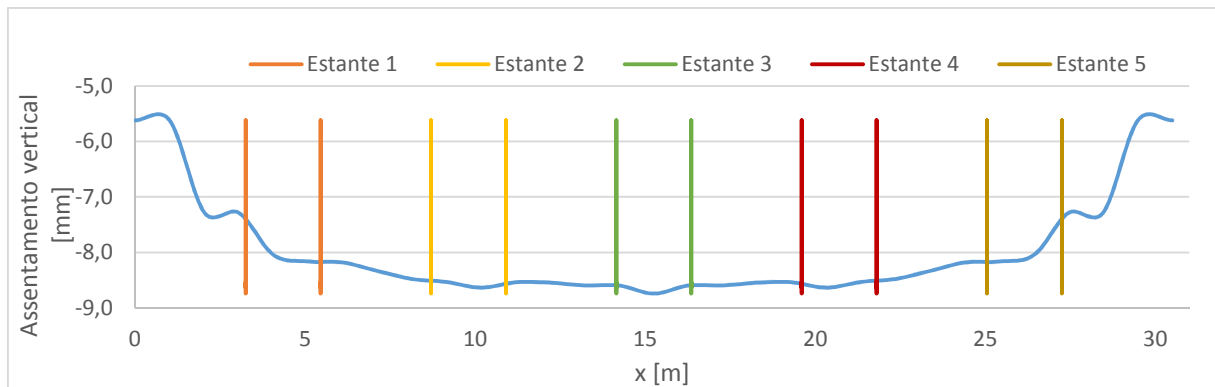


Figura 36 - Gráfico de deslocamentos verticais ao longo do alinhamento central ($y=15,4$), com carregamento total

Da análise do gráfico pode verificar-se que ocorrem deslocamentos verticais ao longo de todo o pavimento podendo destacar-se as zonas por baixo das cinco estantes, onde se verificam assentamentos diferenciais maiores. Em termos gerais, o valor máximo obtido é de 8,7 mm e a variação enquadra-se entre esse valor e um mínimo de 5,6 mm. O máximo assentamento obtido verifica-se na zona central do pavimento e o mínimo acontece próximo dos limites do mesmo. Na direção paralela aos corredores, as cargas apresentam-se distribuídas ao longo dos alinhamentos das cinco estantes presentes no modelo, podendo verificar-se que a zona central é a mais afetada pela ação desse carregamento, sendo nesse ponto que se verifica um maior assentamento total.

Em termos de análise segundo o TR 34, uma vez que se trata de um estudo de um pavimento genérico, numa área de armazenamento em que não são conhecidas as alturas atingidas pelas estantes ou os equipamentos a utilizar nas instalações, foi realizada uma análise que se faria para um pavimento classificado como FM2 (*Free-movement*), como é sugerido pelo documento referido, para que se obtenham as melhores condições de um pavimento capaz de se adaptar a diferentes tipos de funções.

Uma vez considerado um pavimento de classe FM2, ter-se-ão de verificar duas propriedades apresentadas anteriormente no capítulo 3: a propriedade E e a propriedade F que se relacionam, respetivamente, com o nivelamento e com a planimetria do pavimento.

Segundo o TR 34, no caso da propriedade E seria necessário realizar avaliações do pavimento ao longo de uma grelha de pontos afastados de 3 m em direções ortogonais, estendida por toda área do pavimento. É necessário verificar se 95% dos valores dos assentamentos diferenciais não ultrapassam 6,5 mm em pontos distanciados de 3 m.

Quanto à propriedade F, é indicado que sejam realizadas investigações num comprimento total de aproximadamente 90 m (equivalente à área total do modelo dividida por 10), 45 m em cada uma das direções ortogonais definidas pela grelha configurada para avaliar a propriedade E.

No caso em estudo estabeleceu-se que seria suficiente avaliar as zonas do pavimento onde se verificarem maiores deformações, assegurando análises nos locais onde potencialmente se podem verificar assentamentos diferenciais que não cumpram os requisitos impostos pelo TR 34.

Na Figura 37 apresenta-se um esquema dos alinhamentos analisados para a propriedade E e a grelha definida para a realização dessa análise.

A avaliação da propriedade F, como já foi referido, deve ser realizada ao longo dos alinhamentos definidos na grelha de análise da propriedade E e deve distribuir-se de forma uniforme ao longo da superfície do pavimento. A primeira condição foi seguida conforme as indicações no TR 34, contudo, a segunda foi simplificada de modo a conseguir obter dados suficientes representativos de uma inspeção

completa. Assim, em vez de distribuir as análises de forma uniforme ao longo do pavimento, aproveitaram-se os alinhamentos definidos para avaliar a propriedade E e verificaram-se nos mesmos os valores da propriedade F. Uma vez que o programa permite obter os dados de modo rápido, a extensão total analisada para esta propriedade excede o que é indicado pelo TR 34, contudo, uma vez que se trata de uma análise teórica, optou-se por aproveitar todos os dados obtidos.

Na Tabela 10 apresentam-se os resultados obtidos da análise das propriedades E e F ao longo dos 10 alinhamentos definidos, apresentando o valor máximo absoluto de cada propriedade obtido para cada alinhamento.

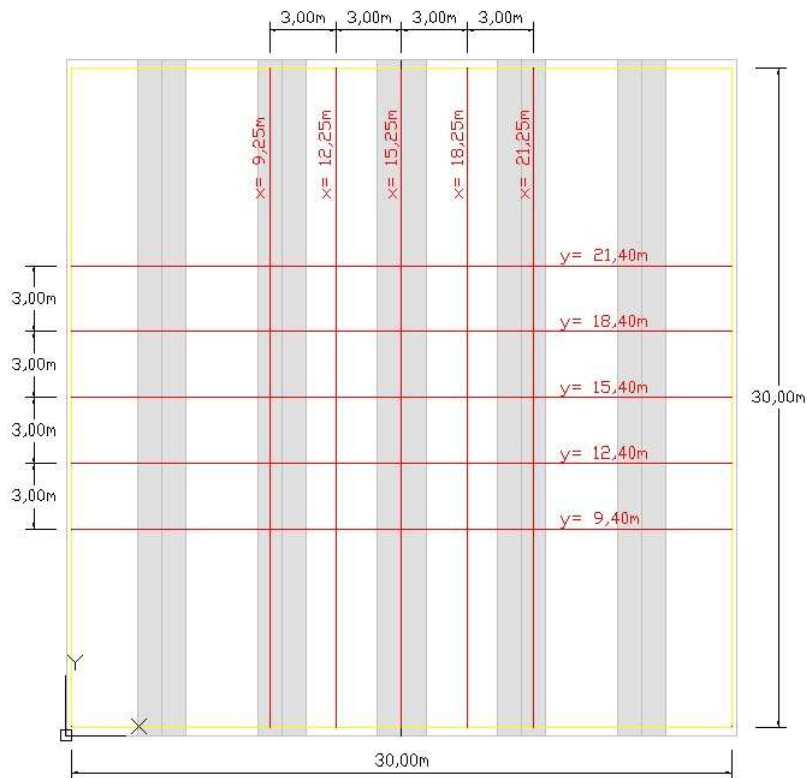


Figura 37 – Alinhamentos e grelha de análise da propriedade E

Tabela 10 - Valores obtidos para a propriedade E e F para o carregamento total das estantes

Alinhamento	Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	1,7
	12,40	1,7
	15,40	1,7
	18,40	1,7
	21,40	1,7
x [m]	9,25	1,1
	12,25	1,1
	15,25	1,2
	18,25	1,1
	21,25	1,1

Pela análise dos valores obtidos, pode verificar-se qual a tendência do comportamento do pavimento segundo a direção paralela e perpendicular relativamente ao alinhamento das estantes e corredores. Verificando os valores obtidos para a propriedade E verifica-se que se obtêm valores maiores (1,7 mm) na direção X, perpendicular às estantes e corredores. No que diz respeito à propriedade F, verifica-se que os valores mais elevados são semelhantes em ambas as direções.

No que diz respeito aos valores obtidos quer para a propriedade E quer para a propriedade F, os mesmos estão dentro dos limites impostos pelo TR 34, respetivamente, 6,5 mm e 2,0 mm.

Além da análise de deformações foi realizada também uma análise do estado de tensão na camada do solo de fundação, tal como no caso de carga apresentado anteriormente. Na Figura 38 apresenta-se o gráfico com escala de cores obtido através do programa para a análise dos fatores de segurança nessa camada. Verifica-se que neste caso de carga obtêm-se diferentes valores para o fator de segurança no topo da camada do solo de fundação, o que seria de esperar atendendo ao tipo de solicitação. Apesar disso, o valor mínimo verificado, de aproximadamente 1,6, enquadra-se nos valores adequados para o tipo de carregamento em causa, isto é, cargas concentradas devidas ao carregamento total das estantes.

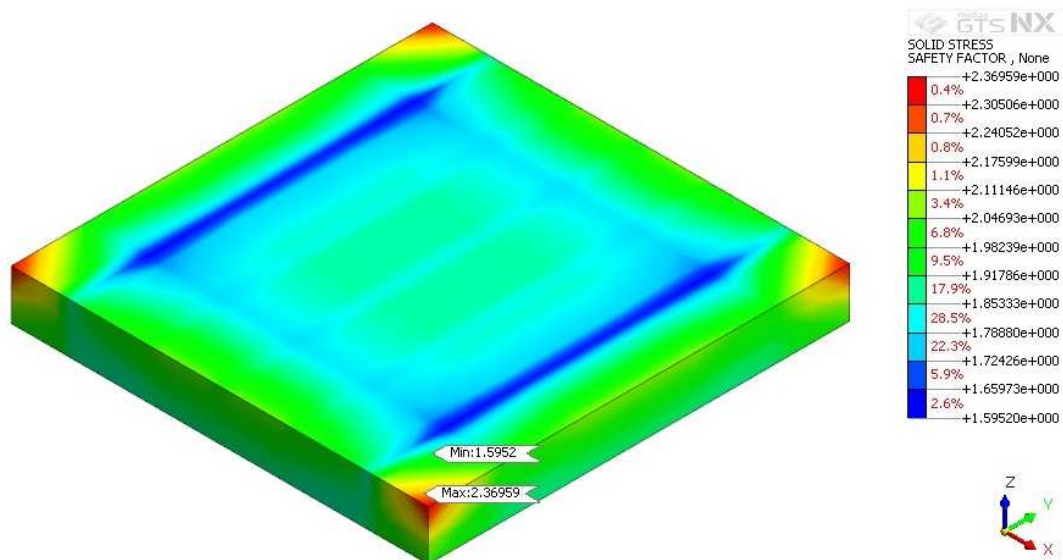


Figura 38 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento total das estantes

5.2.3. ANÁLISE DE CARGAS CONCENTRADAS – CARREGAMENTO ALTERNADO

De seguida analisou-se o caso de cargas concentradas em que apenas se considerou o carregamento das duas estantes das extremidades do modelo e da central (designadas como estantes 1, 3 e 5).

Tal como para o caso anterior, foram avaliados os deslocamentos verticais obtidos ao longo do pavimento, num alinhamento central perpendicular à direção das estantes e corredores. Na Figura 39 apresenta-se o gráfico obtido para o caso de carregamento das estantes alternadas, podendo verificar-se que os assentamentos totais são menores mas os diferenciais, à partida, apresentam-se maiores.

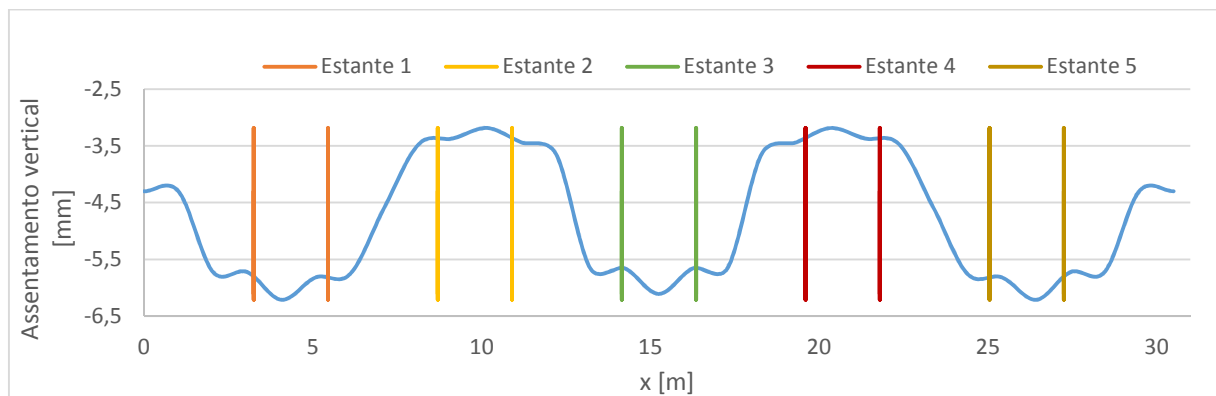


Figura 39 - Gráfico de assentamentos verticais ao longo do alinhamento central ($y=15,4$), com carregamento alternado

O valor máximo de deslocamento vertical é de, aproximadamente, 6 mm, nas zonas de carregamento que correspondem às estantes 1, 3 e 5 totalmente carregadas.

Para verificar se o pavimento apresentava os requisitos mínimos necessários associados à regularidade da superfície do pavimento segundo o TR 34 foi realizada uma análise semelhante à do caso anterior de carregamento, tendo sido obtidos os valores absolutos para as propriedades E e F, os quais se apresentam na Tabela 11. Tal como no caso de carga anterior, verifica-se que para a propriedade E os valores são maiores na direção perpendicular às estantes e corredores, sendo que neste caso os valores são maiores que no caso anterior (2,5 mm). Ainda assim, os valores obtidos encontram-se dentro dos limites estabelecidos pelo TR 34. No que diz respeito à propriedade F, verifica-se que não há nenhuma direção preferencial onde aconteçam assentamentos diferenciais mais acentuados e os mesmos encontram-se dentro do limite indicado pelo TR 34.

Tabela 11 - Valores obtidos para a propriedade E e F para o carregamento alternado

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	2,4	0,4
	12,40	2,5	1,1
	15,40	2,5	1,0
	18,40	2,5	1,1
	21,40	2,4	0,4
x [m]	9,25	0,2	0,1
	12,25	0,6	1,5
	15,25	1,2	0,4
	18,25	0,6	1,5
	21,25	0,2	0,1

Tal como nos casos de carga analisados anteriormente, foi analisado o estado de tensão da camada G4 do modelo. Na Figura 40 apresenta-se o gráfico relativo ao fator de segurança. Para este caso de carga, verifica-se que o fator de segurança, em alguns pontos do topo da camada atinge valores mínimos de aproximadamente 1,4. Estes valores apresentam-se ao longo das zonas das estantes carregadas. Sendo um valor um pouco abaixo dos valores considerados recomendados, ainda assim é aceitável.

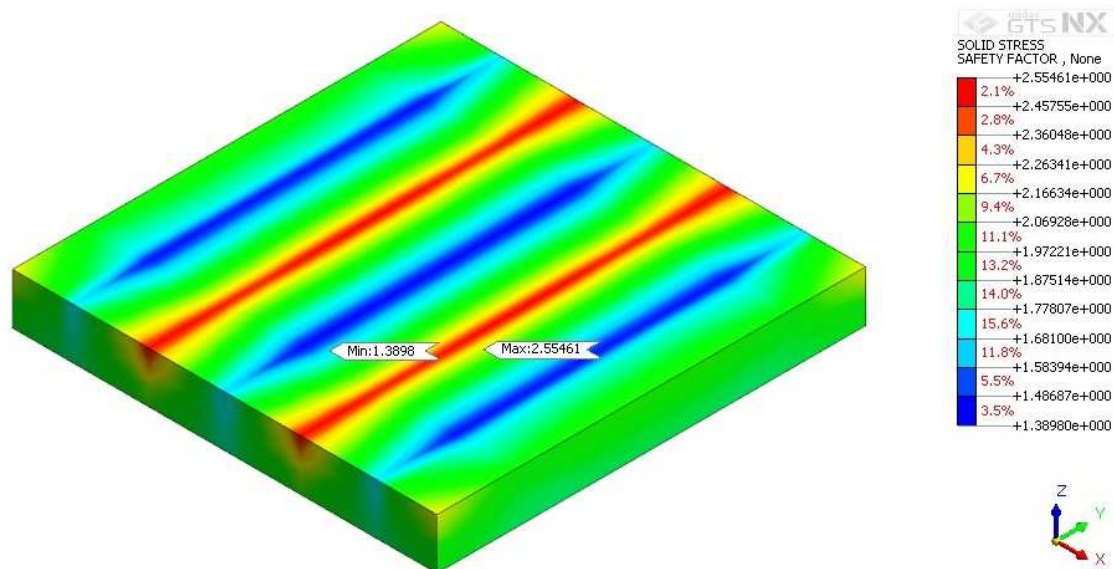


Figura 40 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento alternado das estantes

5.2.4. ANÁLISE DE CARGAS ROLANTES

A análise relativa a cargas rolantes, como já foi explicado no capítulo anterior, foi efetuada de modo simplificado, pela representação da transmissão das cargas rolantes através da área de contacto dos pneus do eixo dianteiro. Essas cargas foram consideradas cargas distribuídas, centradas num corredor do pavimento.

Uma vez que a solicitação é constante e o pavimento apresenta características uniformes ao longo da sua extensão, procede-se apenas à simulação de um troço de um corredor.

Na Figura 41 apresenta-se a deformada obtida devido ao efeito das cargas transmitidas numa área de $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$ no corredor 1 do modelo. Verifica-se que o assentamento máximo obtido, na zona do carregamento, é de aproximadamente 0,6 mm.

Uma vez verificado o assentamento total, foi necessário avaliar as propriedades E e F referidas no TR 34. Para isso, criaram-se tabelas a partir dos dados retirados do programa que permitiram analisar os assentamentos diferenciais espaçados de 3 m e de 0,3 m, para verificar as propriedades E e F, respetivamente. Parte dos dados analisados foram retirados de alinhamentos da grelha de análise criada para avaliar a propriedade E. Uma vez que neste caso a zona carregada é de apenas $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$, foi necessário encontrar os alinhamentos que intersetassem essa zona para desenvolver a análise das propriedades. Assim, os alinhamentos analisados foram, no eixo XX, 6,45 e 9,45 m, e no eixo YY, 3,4 e 6,4 m.

Na Tabela 12 apresentam-se os resultados obtidos para cada uma das propriedades analisadas, em valores absolutos. Neste caso de carga, verifica-se, para os alinhamentos nas duas direções, valores das propriedades E e F dentro dos limites impostos pelo TR 34.

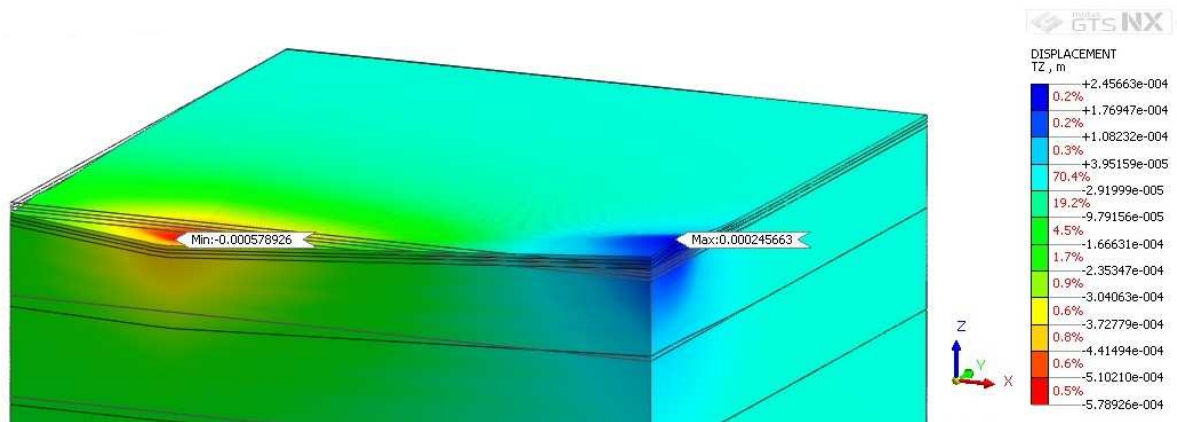


Figura 41 - Representação tridimensional dos deslocamentos verticais devido à carga rolante

Tabela 12 - Valores obtidos para a propriedade E e F para o carregamento de cargas rolantes

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	3,40	0,3	0,8
	6,40	0,3	0,4
x [m]	6,45	0,4	0,0
	9,45	0,1	0,0

Na Figura 42 apresenta-se o gráfico relativo ao fator de segurança em relação à rotura. A zona de carregamento representada nesta análise corresponde a um ponto que se iria reproduzir ao longo dos corredores. Uma vez que as propriedades do pavimento e do terreno são consideradas homogêneas em toda a sua extensão, a representação de um único ponto é suficiente para compreender o que aconteceria ao longo de um corredor em que a carga representada apenas se ia movimentando à medida que o equipamento fosse percorrendo os corredores.

Surgem no topo da camada do solo de fundação valores para o fator de segurança que devem atingir um valor mínimo ligeiramente acima de 1,9. Este valor, embora inferior a 2, pode ser considerado adequado para o tipo de carregamento em causa.

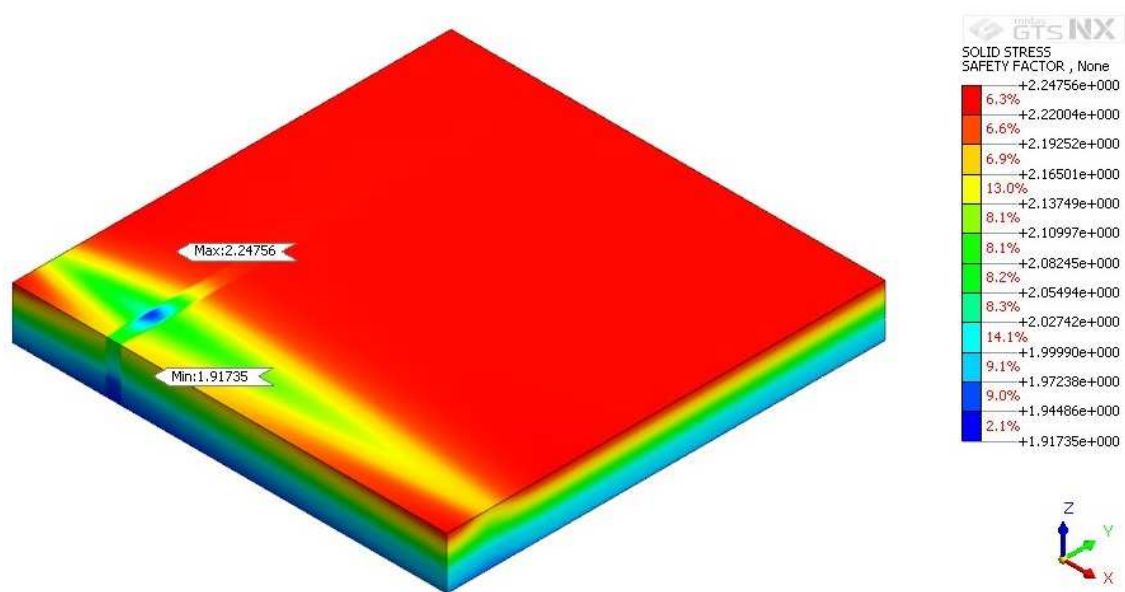


Figura 42 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação da carga rolante

5.3. ESTUDO PARAMÉTRICO RELATIVO À ESTRUTURA DO PAVIMENTO

Nesta secção desenvolve-se um estudo paramétrico, fazendo variar a espessura dos elementos do pavimento, com o objetivo de comparar os resultados entre si. Após a modelação dos diferentes casos de análise, trataram-se os dados e construíram-se tabelas correspondentes a cada uma das propriedades analisadas pelo TR 34, propriedade E e F. Além disso, verificou-se também o fator de segurança em relação à rotura do solo de fundação.

5.3.1. VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA LAJE

Verificou-se que a espessura mínima para a laje de betão especificada pelo TR 34 é de 0,15 m. Assim, para além do pavimento anteriormente apresentado (laje de 0,18 m), calcularam-se pavimentos com espessura de laje de 0,15, 0,16 e 0,17 m.

5.3.1.1. Análise de cargas concentradas – carregamento total

Nas tabelas seguintes apresentam-se, para os pavimentos com lajes de 0,17, 0,16 e 0,15 m, os resultados relativos às propriedades E e F, em valores absolutos, avaliados nos mesmos alinhamentos que foram considerados nos casos de cargas concentradas devido às estantes apresentados anteriormente.

Os valores obtidos para todos os casos analisados continuam a cumprir os requisitos impostos pelo TR 34.

Uma vez que o que se pretende garantir é o cumprimento desses requisitos, verificou-se qual o valor máximo atingido para cada propriedade consoante a direção dos alinhamentos analisados, nos pavimentos com várias espessuras de laje. Na Figura 43 apresenta-se a variação das propriedades geométricas com da espessura da laje do pavimento.

Verifica-se que a propriedade E é mais influenciada pela variação da espessura da laje do que a propriedade F. À medida que a espessura da laje aumenta verifica-se um decréscimo dos valores de ambas as propriedades, sendo para a propriedade E mais visível essa variação.

Em termos de alinhamentos, verifica-se, para a propriedade F, que segundo os alinhamentos em YY, (direção paralela às estantes e corredores) ocorre uma variação maior do que na direção perpendicular, embora a amplitude dessa variação seja muito pequena. Para a propriedade E verifica-se que ocorrem valores mais importantes na direção dos alinhamentos em YY. Em termos práticos, isto significa que o nivelamento do pavimento é mais afetado na direção paralela às estantes e corredores e que se verificam mais irregularidades a nível de planimetria também nessa direção, para este caso de carga.

Apesar de se verificarem as irregularidades referidas, os valores enquadram-se nos limites impostos pelo TR 34, pelo que se torna viável, para este tipo de carregamento, considerar a laje menos espessa.

Tabela 13 - Propriedades E e F para o caso de carregamento total e laje com espessura 0,17 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	1,9	0,6
	12,40	1,9	0,9
	15,40	1,9	0,8
	18,40	1,9	0,9
	21,40	1,9	0,6
x [m]	9,25	1,2	0,6
	12,25	1,1	0,9
	15,25	1,4	0,5
	18,25	1,1	0,9
	21,25	1,2	0,6

Tabela 14 - Propriedades E e F para o caso de carregamento total e laje com espessura 0,16 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	1,9	0,6
	12,40	1,9	0,9
	15,40	1,9	0,8
	18,40	1,9	0,9
	21,40	1,9	0,6
x [m]	9,25	1,2	0,6
	12,25	1,1	0,9
	15,25	1,4	0,5
	18,25	1,1	0,9
	21,25	1,2	0,6

Tabela 15 - Propriedades E e F para o caso de carregamento total e laje com espessura 0,15 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	2,0	0,6
	12,40	2,0	0,9
	15,40	2,0	0,9
	18,40	2,0	0,9
	21,40	2,0	0,6
x [m]	9,25	1,3	0,7
	12,25	1,2	0,9
	15,25	1,5	0,6
	18,25	1,2	0,9
	21,25	1,3	0,7

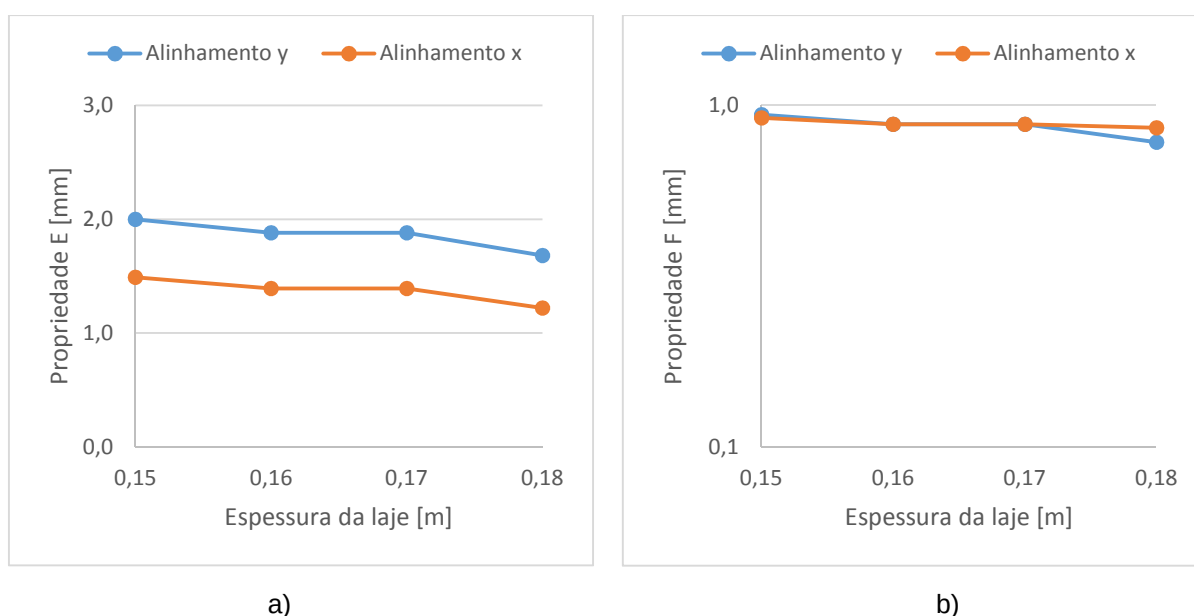


Figura 43 - Influência da espessura da laje nas propriedades geométricas do pavimento (carregamento total): a) propriedade E; b) propriedade F

Após a verificação da regularidade do pavimento, tal como tem sido feito ao longo de todos os casos de carga estudados, foi também avaliado o estado de tensão do solo de fundação do modelo. Para isso foram obtidos, através do programa, os valores dos fatores de segurança para o caso mais desfavorável, isto é, para a laje com 0,15 m. Na Figura 44 apresenta-se o gráfico com escala de cores.

Para o caso de carregamento total das estantes, os valores menores do fator de segurança que ocorrem na camada do solo de fundação são de cerca de 1,5, o que se pode considerar adequado.

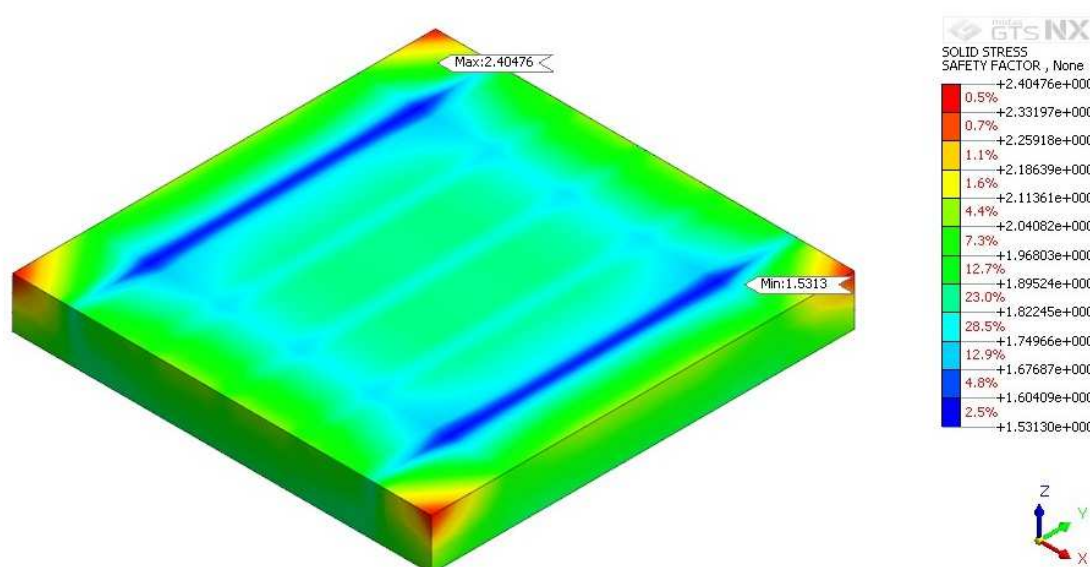


Figura 44 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento total das estantes, laje com espessura 0,15 m

5.3.1.2. Análise de cargas concentradas – carregamento alternado

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores obtidos para as propriedades E e F para as diferentes espessuras de laje de betão analisadas, quando se simula carregamento alternado.

Tabela 16 - Propriedades E e F para o caso de carregamento alternado e laje com espessura 0,17 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	2,5	0,5
	12,40	2,6	1,2
	15,40	2,6	1,1
	18,40	2,6	1,2
	21,40	2,5	0,5
x [m]	9,25	0,2	0,1
	12,25	0,7	1,6
	15,25	1,3	0,5
	18,25	0,7	1,6
	21,25	0,2	0,1

Tabela 17 - Propriedades E e F para o caso de carregamento alternado e laje com espessura 0,16 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	2,5	0,5
	12,40	2,7	1,2
	15,40	2,7	1,1
	18,40	2,7	1,2
	21,40	2,5	0,5
x [m]	9,25	0,2	0,1
	12,25	0,7	1,6
	15,25	1,4	0,5
	18,25	0,7	1,6
	21,25	0,2	0,1

Tabela 18 - Propriedades E e F para o caso de carregamento alternado e laje com espessura 0,15 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	2,6	0,5
	12,40	2,8	1,3
	15,40	2,8	1,2
	18,40	2,8	1,3
	21,40	2,6	0,5
x [m]	9,25	0,2	0,1
	12,25	0,7	1,7
	15,25	1,5	0,6
	18,25	0,7	1,7
	21,25	0,2	0,1

Na Figura 45, apresentam-se os gráficos que relacionam os valores das propriedades E e F com a variação da espessura da laje de betão.

Pela análise dos gráficos obtidos conclui-se que existe uma relação clara entre a variação das propriedades e a espessura da laje de betão, verificando que à medida que se aumenta a espessura da mesma os valores das propriedades diminuem. Pode também verificar-se que nos alinhamentos paralelos às estantes e corredores (YY) os valores da propriedade E são maiores, o que permite concluir que no caso de carregamento alternado existe um maior desnivelamento ao longo dessa direção. Nos alinhamentos perpendiculares às estantes e corredores (XX) os valores da propriedade F são maiores, ou seja, ocorrem situações de irregularidades relativas à planimetria do pavimento com maior relevância nesta direção.

Uma vez que os valores se encontram todos dentro dos valores limite impostos pelo TR 34, para este caso de carregamento e para os anteriores, não haveria qualquer problema em diminuir a espessura da camada da laje de betão.

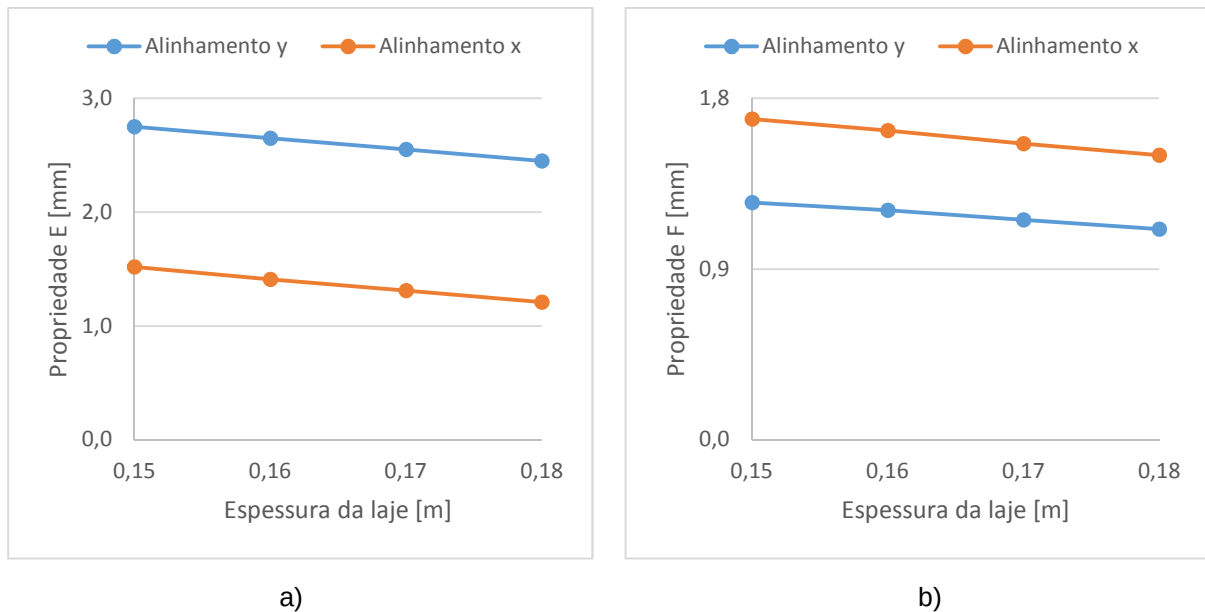


Figura 45 - Influência da espessura da laje nas propriedades geométricas do pavimento (carregamento alternado): a) propriedade E; b) propriedade F

No que se refere ao estado de tensão do solo de fundação, na Figura 46 apresentam-se os valores dos fatores de segurança obtidos a partir do programa para o caso da laje com 0,15 m de espessura e o carregamento alternado das estantes.

Neste caso, o valor mínimo do fator de segurança é de cerca de 1,34, portanto inferior ao valor mínimo que tinha sido considerado adequado.

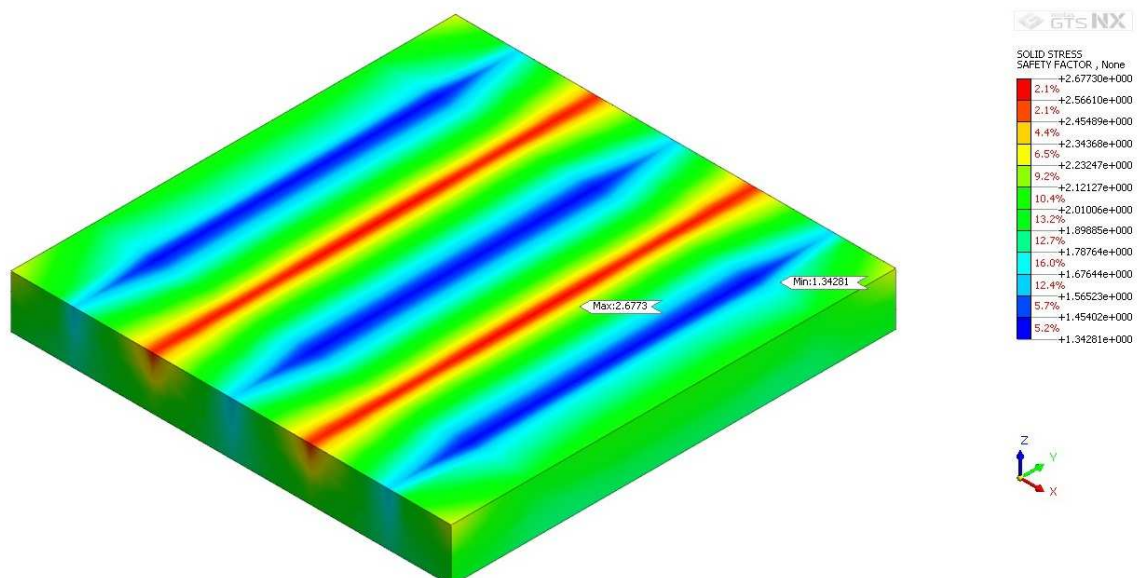


Figura 46 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento alternado das estantes, laje com espessura 0,15 m

5.3.1.3. Análise de cargas rolantes

As cargas rolantes, como já foi verificado no caso analisado inicialmente (laje de 0,18 m), apresentam valores relativos às propriedades E e F relativamente baixos. Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores calculados destas propriedades nos casos relativos às espessuras de laje em análise.

Verifica-se que não existe uma variação muito significativa dos valores das propriedades avaliadas pelo TR 34, pelo que não fará muita diferença considerar uma variação da espessura da laje.

Tabela 19 - Propriedades E e F para o caso de cargas rolantes e laje com espessura 0,17 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	3,40	0,4	0,8
	6,40	0,1	0,3
x [m]	6,45	0,3	0,0
	9,45	0,3	0,0

Tabela 20 - Propriedades E e F para o caso de cargas rolantes e laje com espessura 0,16 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	3,40	0,4	0,8
	6,40	0,1	0,3
x [m]	6,45	0,3	0,0
	9,45	0,3	0,0

Tabela 21 - Propriedades E e F para o caso de cargas rolantes e laje com espessura 0,15 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	3,40	0,4	0,9
	6,40	0,1	0,3
x [m]	6,45	0,4	0,0
	9,45	0,3	0,0

No que se refere ao estado de tensão, como se constata na Figura 47, o valor mínimo do fator de segurança é de cerca de 1,9, o que, embora inferior a 2, pode ser considerado adequado.

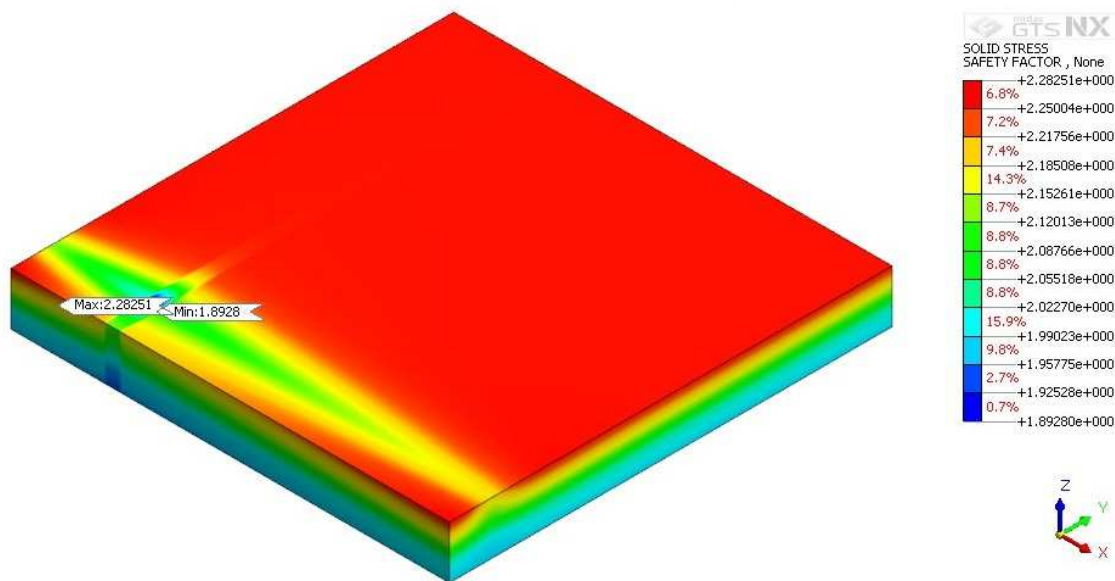


Figura 47 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação de cargas rolantes, laje com espessura 0,15 m

5.3.2. VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE AGREGADO BRITADO DE GRANULOMETRIA EXTENSA (ABGE)

Para além da variação da espessura da laje de betão presente na estrutura do pavimento, efetuou-se um estudo relativo à variação da espessura das camadas de ABGE presentes no mesmo. Uma vez que as mesmas apresentam propriedades iguais e apenas se diferenciam em duas camadas por motivos construtivos, para a realização da referida análise, considerou-se apenas uma camada de ABGE com uma espessura correspondente à soma das duas camadas. Anteriormente os cálculos foram realizados considerando uma espessura de 0,35 m (0,20+0,15). Avalia-se agora o comportamento do pavimento em outras duas situações, nomeadamente quando essa camada tem 0,30 e 0,20 m de espessura.

5.3.2.1. Análise de cargas concentradas – carregamento total

Para a análise de cargas concentradas, com carregamento total das estantes, procedeu-se ao mesmo tipo de análise realizado para o mesmo caso de carga na análise de variação de espessura da laje de betão. Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores absolutos para as propriedades E e F, considerando a camada de ABGE com 0,30 e 0,20 m de espessura.

Tabela 22 - Propriedades E e F para o caso de carregamento total e ABGE com espessura 0,30 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	1,7	0,6
	12,40	1,7	0,8
	15,40	1,7	0,8
	18,40	1,7	0,8
	21,40	1,7	0,6
x [m]	9,25	1,1	0,6
	12,25	1,1	0,9
	15,25	1,2	0,5
	18,25	1,1	0,9
	21,25	1,1	0,6

Tabela 23 - Propriedades E e F para o caso de carregamento total e ABGE com espessura 0,20 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	1,7	0,6
	12,40	1,7	0,8
	15,40	1,7	0,8
	18,40	1,7	0,8
	21,40	1,7	0,6
x [m]	9,25	1,1	0,6
	12,25	1,1	0,9
	15,25	1,3	0,5
	18,25	1,1	0,9
	21,25	1,1	0,6

Na Figura 48 apresenta-se a variação dos valores máximos das propriedades E e F, em ambas as direções, com a espessura da camada de ABGE. Em termos gerais, a variação da espessura da camada de ABGE não apresenta muita influência na variação das propriedades E e F que avaliam o nivelamento e a planimetria da superfície do pavimento. Os valores obtidos encontram-se todos dentro dos limites estabelecidos pelo TR 34 e, por isso, para este caso de carga, não há impedimentos em termos de alteração da espessura da camada de ABGE do pavimento.

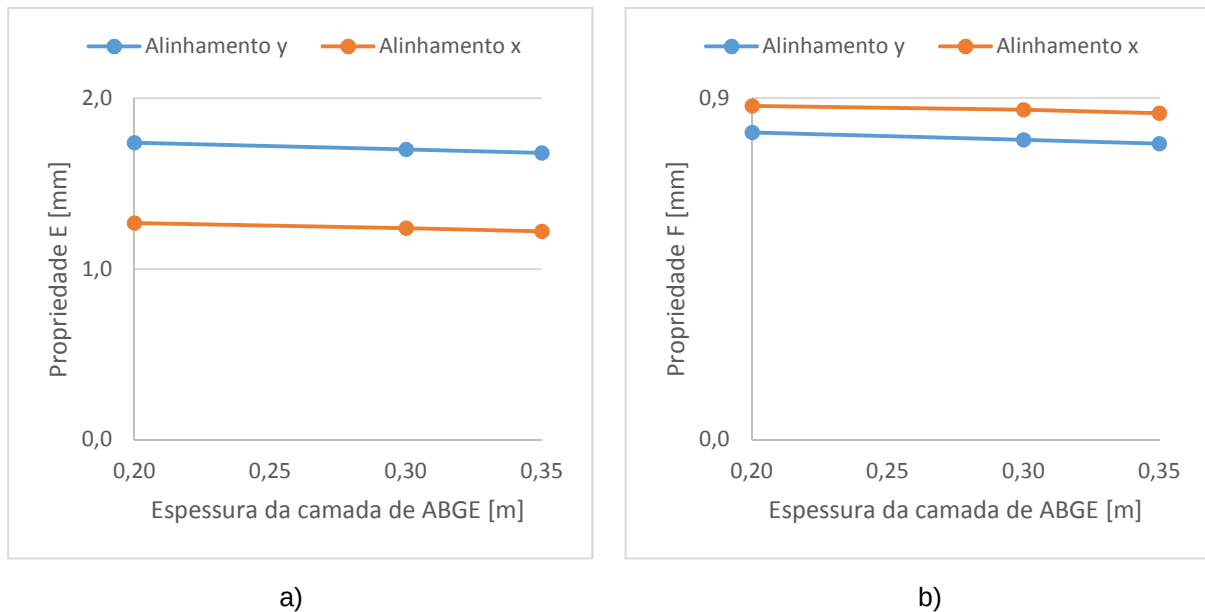


Figura 48 – Influência da espessura da camada de ABGE nas propriedades geométricas do pavimento (carregamento total): a) propriedade E; b) propriedade F

Os fatores de segurança na camada G4 do modelo com ABGE de 0,20 m de espessura e com o carregamento total das estantes são os que se apresentam na Figura 49. O valor mínimo é de cerca de 1,6, o que pode ser considerado adequado para este tipo de carga.

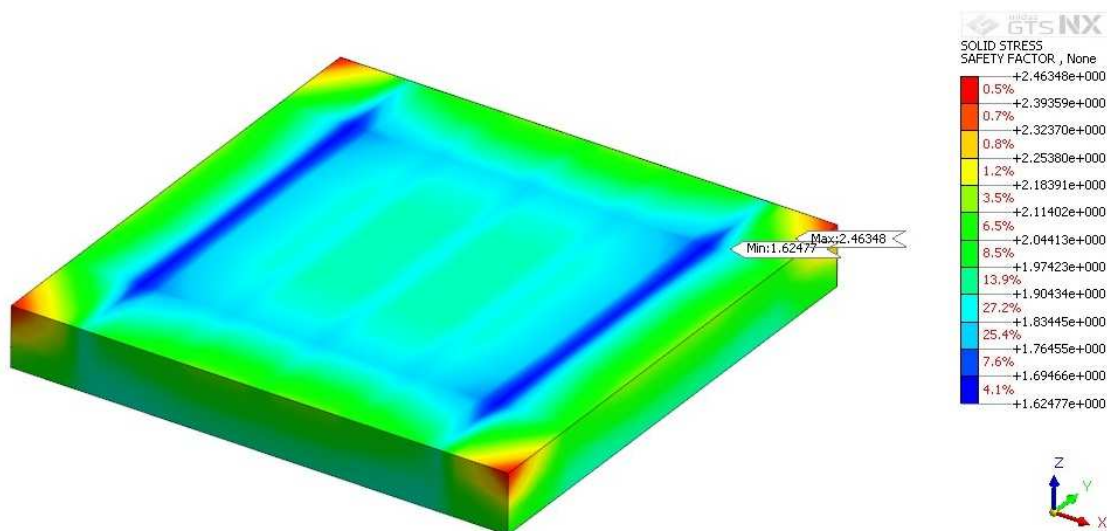


Figura 49 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento total das estantes e ABGE com espessura 0,20 m

5.3.2.2. Análise de cargas concentradas – carregamento alternado

Os valores absolutos das propriedades E e F obtidos para verificar os efeitos a nível da superfície do pavimento no caso das cargas concentradas em carregamento alternado, quando se varia a espessura da camada de ABGE, são apresentados nas tabelas seguintes.

Tabela 24 - Propriedades E e F para o caso de carregamento alternado e ABGE com espessura 0,30 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	2,4	0,4
	12,40	2,5	1,1
	15,40	2,5	1,0
	18,40	2,5	1,1
	21,40	2,4	0,4
x [m]	9,25	0,2	0,1
	12,25	0,7	1,5
	15,25	1,2	0,4
	18,25	0,7	1,5
	21,25	0,2	0,1

Tabela 25 - Propriedades E e F para o caso de carregamento alternado e ABGE com espessura 0,20 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	9,40	2,5	0,5
	12,40	2,6	1,2
	15,40	2,6	1,1
	18,40	2,6	1,2
	21,40	2,5	0,5
x [m]	9,25	0,2	0,1
	12,25	0,7	1,6
	15,25	1,3	0,5
	18,25	0,7	1,6
	21,25	0,2	0,1

Na Figura 50 apresenta-se a variação dos valores máximos das propriedades E e F, em ambas as direções, com a espessura da camada de ABGE, para o carregamento alternado. Em termos gerais, a variação da espessura da camada de ABGE não apresenta muita influência na variação das propriedades E e F que avaliam o nivelamento e a planimetria da superfície do pavimento. Os valores obtidos cumprem os requisitos estabelecidos pelo TR 34 e, por isso, também neste caso de carga não há impedimentos em termos de alteração da espessura da camada de ABGE do pavimento.

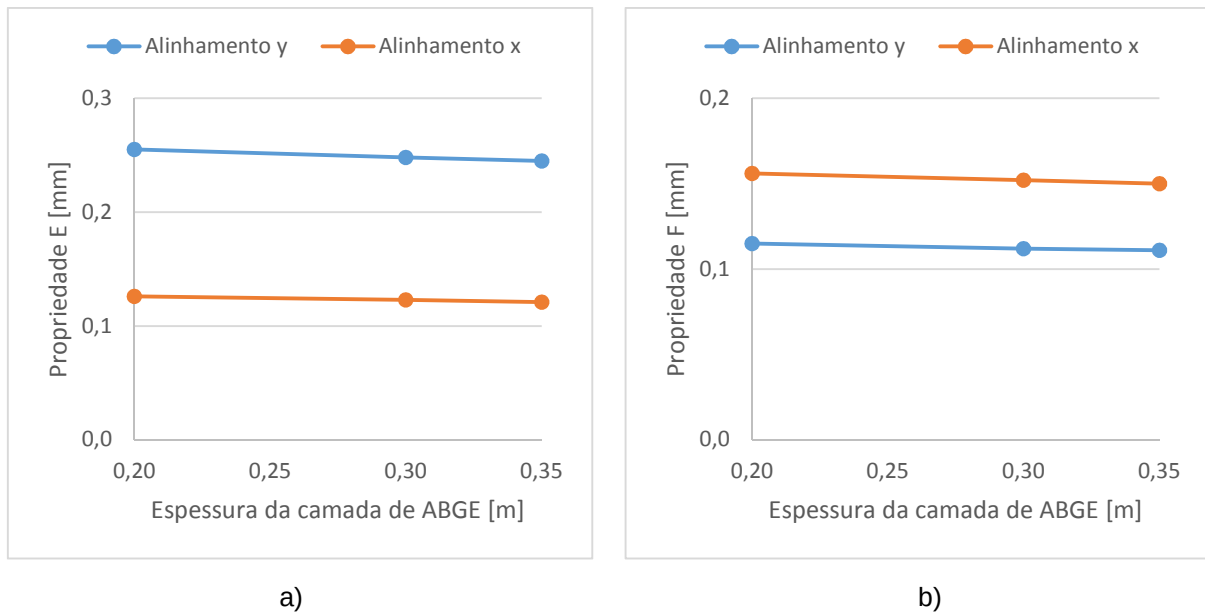


Figura 50 - Influência da espessura da camada de ABGE nas propriedades geométricas do pavimento (carregamento alternado): a) propriedade E; b) propriedade F

Na Figura 51 apresentam-se os valores dos fatores de segurança obtidos para a camada G4 do modelo, para a camada de ABGE de 0,20 m de espessura, considerando o carregamento alternado.

Para este caso de carga, os valores mínimos do fator de segurança obtidos são de cerca de 1,4.

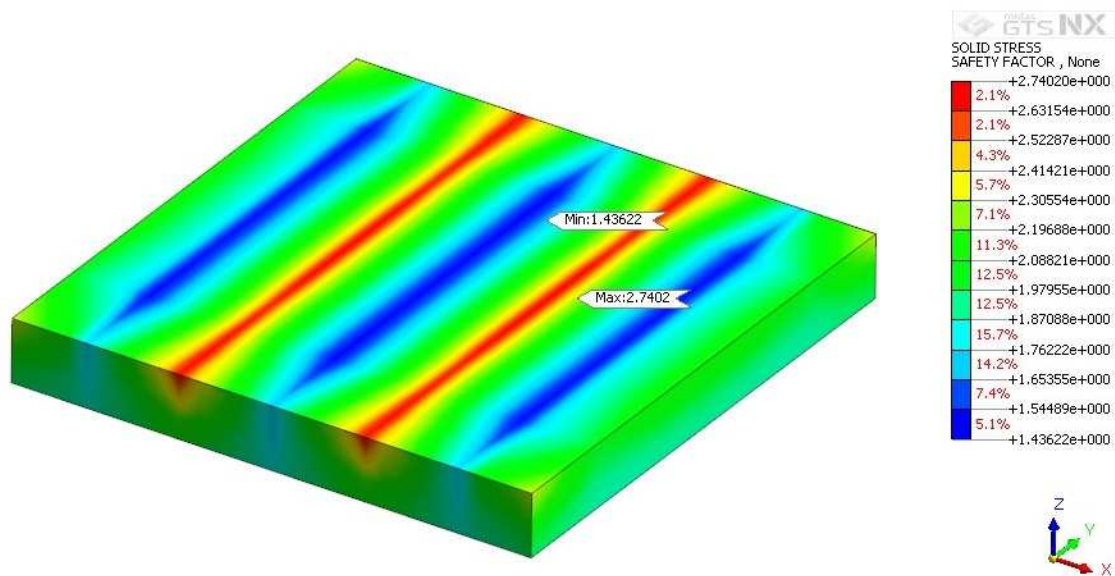


Figura 51 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação do carregamento alternado das estantes e ABGE com espessura 0,20 m

5.3.2.3. Análise de cargas rolantes

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores absolutos máximos obtidos para as propriedades E e F associados ao comportamento geométrico decorrente da ação das cargas rolantes para cada espessura da camada de ABGE analisada.

Não se verifica variação significativa quer nos valores da propriedade E quer nos valores da propriedade F, podendo concluir-se que a variação da espessura da camada de ABGE não terá relevância no que se refere ao cumprimento do estabelecido no TR 34.

Tabela 26 - Propriedades E e F para o caso de cargas rolantes e ABGE com espessura 0,30 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	3,40	0,4	0,8
	6,40	0,1	0,4
x [m]	6,45	0,3	0,0
	9,45	0,3	0,0

Tabela 27 - Propriedades E e F para o caso de cargas rolantes e ABGE com espessura 0,20 m

Alinhamento		Propriedade E [mm]	Propriedade F [mm]
y [m]	3,40	0,4	0,8
	6,40	0,1	0,4
x [m]	6,45	0,3	0,0
	9,45	0,3	0,0

Na Figura 52 apresenta-se o gráfico com escalas de cores relativo aos fatores de segurança obtidos na camada G4 do modelo devido à ação das cargas rolantes. Os resultados obtidos assumem valores de cerca de 1,9, o que se pode considerar aceitável, ainda que inferiores a 2.

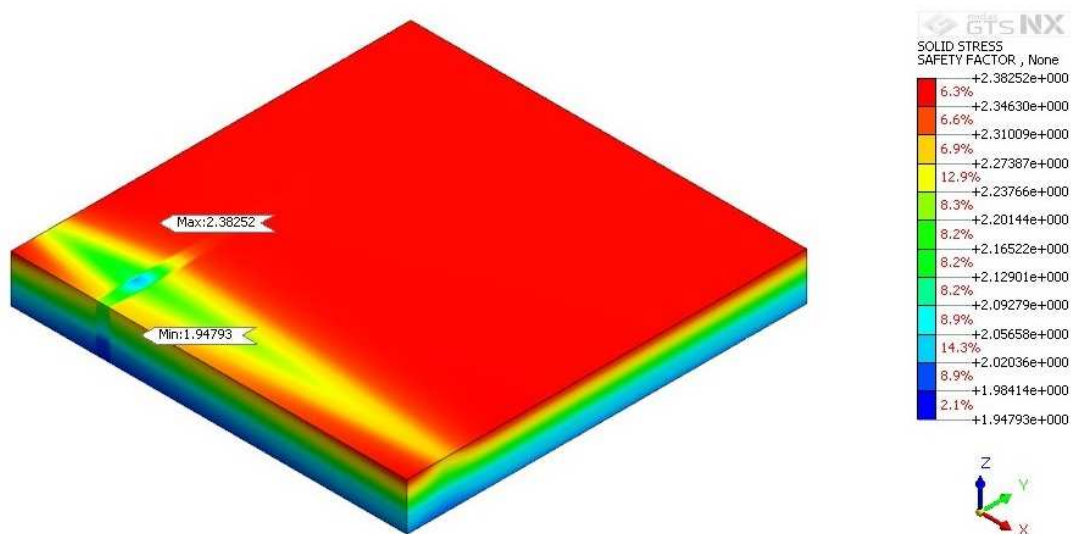


Figura 52 - Variação do fator de segurança na camada de solo de fundação sob ação de cargas rolantes e ABGE com espessura 0,20 m

5.4. ANÁLISE DOS CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DAS DIVERSAS SOLUÇÕES DE PAVIMENTO

No sentido de enquadrar o estudo realizado num dos objetivos principais para os quais a engenharia civil é praticada, otimização da utilização dos materiais de forma a obter projetos com o maior equilíbrio possível entre funcionalidade e custos de produção, procurou-se valorizar os custos por metro cúbico de volume construído com preços relativos às camadas da estrutura de pavimento. Neste caso em concreto, o projeto analisado recorreu à utilização de uma camada de betão armado com fibras para a laje de pavimento e agregado britado de granulometria extensa (ABGE) para a camada que lhe é subjacente. Na Tabela 28 apresentam-se os valores médios (incluindo custos de material, encargos de construção, etc.) dos preços por metro cúbico das camadas referidas.

Tabela 28 – Preços médios por metro cúbico de construção das camadas da estrutura de pavimento

Camada de pavimento	Preço [€/m ³]
Betão com fibras	120
Agregado britado de granulometria extensa	25

Após se ter verificado que, segundo os requisitos associados à regularidade do pavimento, não há problemas relevantes em realizar reduções da espessura da laje ou das camadas de ABGE, calcularam-se as variações de volume associadas aos casos analisados e estabeleceu-se uma relação entre a variação da espessura das camadas e o preço associado a cada uma delas.

Na Tabela 29 e na Tabela 30 apresentam-se os dados relativos à análise realizada tendo sido considerados como referência os valores associados ao custo por m² do pavimento proposto no projeto, correspondentes a uma laje com 0,18 m de espessura e uma camada de ABGE de 0,35 m (0,20+0,15).

Tabela 29 - Custo de construção do pavimento em função da variação da espessura da laje

Espessura	Custo [€/m ²]	Variação de Custo [€]	Custo/Custo da solução base [%]
0,18	21,6	0,0	100,0%
0,17	20,4	1,2	94,4%
0,16	19,2	2,4	88,9%
0,15	18,0	3,6	83,3%

Tabela 30 - Custo de construção do pavimento em função da variação de espessura da camada de ABGE

Espessura	Custo [€/m ²]	Variação de Custo [€]	Custo/Custo da solução base [%]
0,35	8,8	0,0	100,0%
0,30	7,5	1,3	85,7%
0,20	5,0	3,8	57,1%

A partir dos dados apresentados, produziram-se gráficos que mostram a relação entre a diminuição da espessura das camadas da estrutura do pavimento e o custo de construção associado, quando comparado com o custo da solução proposta. Esses gráficos apresentam-se nas Figura 53 e Figura 54.

No caso do projeto em estudo, uma redução da laje até ao valor mínimo imposto pelo TR 34, 0,15 m, conduz a um custo de cerca de 83,3% do da solução inicial. A redução da variação da camada de ABGE para um valor de 0,20 m de espessura, por sua vez, corresponde a um custo de cerca de 57% do

daquela solução. Como se pode verificar pelos valores apresentados, uma diminuição de 3 cm na espessura da laje corresponde aproximadamente ao mesmo, em termos de custo, que diminuir 5 cm de espessura na camada de agregado britado de granulometria extensa.

Assim, com base nos elementos anteriormente discutidos, quer no que se refere aos critérios relacionados com a geometria do pavimento (segundo o TR 34), os quais estão associados às deformações resultantes das solicitações que ocorrerão durante a operação, quer os relacionados com as tensões instaladas no solo de fundação, poder-se-ia recomendar a construção de um pavimento mais económico.

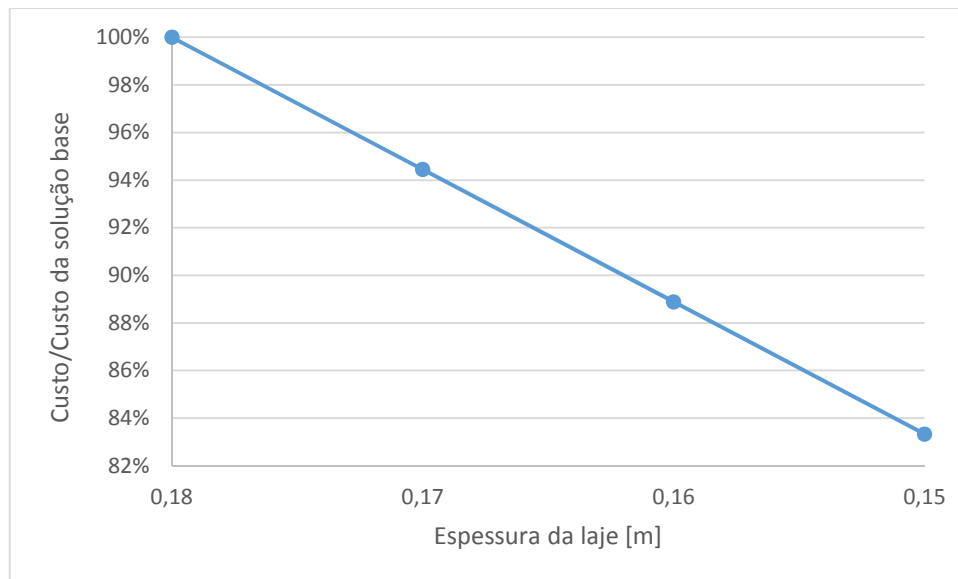


Figura 53 – Variação do custo de construção do pavimento com a variação da espessura da laje

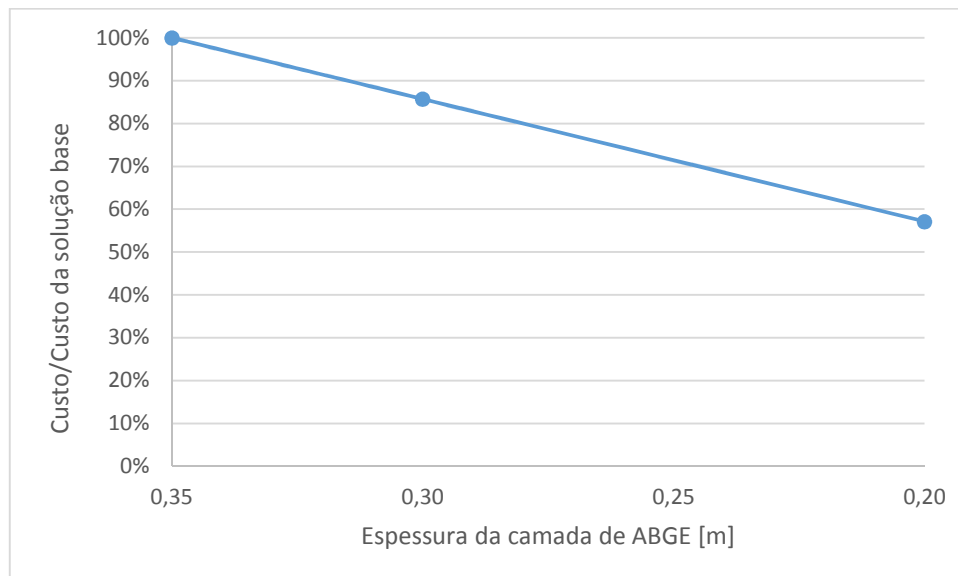


Figura 54 - Variação do custo de construção do pavimento com a variação da espessura da camada de ABGE

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do comportamento dos pavimentos industriais e do solo de fundação subjacente é fundamental para que se consigam obter soluções construtivas que conjuguem um equilíbrio entre a qualidade e o custo de construção deste tipo de estruturas.

A adequada interpretação dos requisitos funcionais deste tipo de estruturas é determinante nas decisões de conceção e construção, para que seja eficiente a respetiva operação e para reduzir o custo do ciclo de vida da estrutura.

Em termos de manutenção, a prática das verificações relativas à regularidade da superfície e o planeamento das mesmas ao longo do tempo de vida útil dos pavimentos pode ser determinante para que se evitem disfunções que, regra geral, geram um decréscimo da produtividade nos espaços industriais, induzem um aumento nos custos de manutenção e reabilitação e, em última análise, podem conduzir a situações de perigo e a riscos de danos nos equipamentos e mercadorias.

O estudo realizado ao longo do presente trabalho permitiu verificar que os requisitos impostos relativos à regularidade da superfície do pavimento são relativamente fáceis de cumprir quando se utilizam estruturas de pavimento comuns. Em condições normais de fundação, e colocando uma camada de materiais britados de granulometria extensa sobre os solos de fundação, o valor mínimo admissível para a espessura da laje de betão estabelecido no manual de dimensionamento que foi utilizado (TR 34) permite garantir as condições de funcionalidade, em termos da geometria da superfície, considerando as solicitações usuais neste tipo de estruturas.

No que diz respeito ao estado de tensão do solo de fundação das estruturas de pavimento analisadas, verificou-se que os casos de carregamento alternado das estantes e a carga rolante conduzem a valores para os fatores de segurança ligeiramente inferiores aos valores normalmente considerados, mas ainda assim aceitáveis.

As análises realizadas permitem concluir que seria possível recorrer a ajustamentos relativamente à estrutura do pavimento, no sentido de procurar uma solução mais económica, quer atendendo à verificação dos critérios de funcionalidade quer aos critérios de estabilidade, em particular os que se relacionam com as características mecânicas dos solos de fundação.

Em trabalhos futuros podem-se conduzir estudos relativos a pavimentos industriais, estudos esses que permitam verificar quais os efeitos da aplicação de técnicas de melhoramento de solos, em simultâneo com alterações relativas à espessura das camadas do pavimento, no sentido de averiguar os benefícios em termos de desempenho e custos de construção e manutenção dos pavimentos. Igualmente, poderão ser considerados os efeitos da existência de juntas de dilatação necessários ao controlo do comporta-

mento da laje de betão que neste trabalho não foram considerados atendendo a que o desenvolvimento da presente tese se centrou na análise do solo enquanto elemento de suporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Committee 360 (2010). *Guide to Design of Slabs-on-Ground*. ACI 360R-10, American Concrete Institute, Farmington Hills.
- AFNOR NF P94-117-1 (2000). *Sols: reconnaissance et essais. Portance des plates-formes. Partie 1: Module sous chargement statique à la plaque (EV2)*. Association Française de Normalisation.
- ASSUNÇÃO, B. (2010). *Colunas de brita e pré-carga em Solos de fundação de Reservatórios de betão armado*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- CONCRETE SOCIETY (2014). TR 34: Concrete Industrial Ground Floors. A guide to design and construction. Fourth Edition. The Concrete Society.
- CRISTELLI, R. (2010). *Pavimentos industriais de concreto – Análise do sistema construtivo*. Monografia em Construção Civil. Escola de Engenharia UFMG.
- BSI BS 5930 (1981). *Code of practice for site investigations (formerly CP 2001)*. British Standard Institution, London.
- BSI BS 1377 (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes – Part 1 to 9*. British Standard Institution, London.
- BSI BS EN 13892-4 (2002). *Methods of test for screed materials. Determination of Wear resistance – BCA*. British Standard Institution, London.
- BSI BS EN 1997-1 (2004). *Eurocode 7 – Geotechnical Design – Part 1 General Rules*. British Standard Institution, London.
- BSI BS EN ISO 22476 (2005). *Geotechnical investigation and testing — Field testing, British Standards Institution – Part 3: Standard Penetration Test*. British Standard Institution, London.
- BSI BS EN 1997-2 (2007). - *Eurocode 7 – Geotechnical Design – Part 2 Ground Investigation and testing*. British Standard Institution, London.
- BSI BS EN ISO 22476-1 (2012a). *Geotechnical investigation and testing — Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration tests*. British Standard Institution, London.
- BSI BS EN ISO 22476-2 (2012b). *Geotechnical investigation and testing — Field testing, British Standards Institution, Part 2: Dynamic probing*. British Standard Institution, London.
- BSI BS EN ISO 22479-12 (2012c). *Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 12: Mechanical cone penetration test*. British Standard Institution, London.
- BSI BS EN ISO 22476-13 (2012d). *Geotechnical investigation and testing — Field testing - Part 13: Plate Load Testing*. British Standard Institution, London.
- DOMINGUES, T. (2006). *Reforço de Fundações com Colunas de Brita em Aterros Sobre Solos Moles – Análise e Dimensionamento*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- FORTUNATO, E. (2005). *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.
- FORTUNATO, E. (2016). Apontamentos de aulas teóricas de Obras de Aterro.
- HOLTZ, R. (2001). *Geosynthetics for soil reinforcement*. 9th Spencer J. Buchanan Lecture, 9 November 2001, pp. 1, College Station Hilton, Seattle, Washington.

IPQ NP EN 206-1 (2007). *Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ NP EN 1991-1-1 (2009). *Eurocódigo 1- Acções em estruturas – Parte 1-1: Acções Gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ NP EN 1992-1-1 (2010). *Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.

KOERNER, R. (2005). *Designing with geosynthetics*. 5th Edition. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.

MATOS FERNANDES, M. (2011). *Mecânica dos solos introdução à engenharia geotécnica*. FEUP Edições, Porto.

SOUSA, J. (2011). Apontamentos de aulas teóricas. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

VIANA DA FONSECA, A. (2014). Apontamentos de aulas teóricas de Fundações.

http://geocastrum.it/indagini_geotecniche.php

http://www.globalturfconsult.com/pdf/SS_Biaxial_Geogrids.pdf

<http://www.toyota-forklifts.com.pt>

<http://www.trovan.com/Applications/warehousing.html>

<http://www.ssi-schaefer.com.br/armazenagem/porta-palete.html>

http://www.wapshanghai.com/index.php?_m=mod_product&_a=view&p_id=174