



**Universidade de
Aveiro**
Ano 2021

Departamento de Engenharia Civil

**Rafael Alexandre
Correia Marques**

**FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS
PARA CAMADAS DE DESGASTE – EFEITOS NA
MACROTEXTURA DO PAVIMENTO**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
Ano 2021

**Rafael Alexandre
Correia Marques**

Formulação de misturas betuminosas para camadas de desgaste – Efeitos na macrotextura do pavimento

Dissertação apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Morais
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Doutor Luís Francisco Amaral Silva
Supervisor de Infraestruturas, Egis Road Operation Portugal

Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço, primeiramente ao Professor Agostinho Benta pela orientação desta dissertação, pela ajuda e disponibilidade demonstrada durante a concretização deste trabalho.

A todo o corpo docente que me acompanhou ao longo do meu percurso académico tornando a minha formação possível.

Aos meus familiares e amigos que me apoiaram neste caminho.

Aos meus irmãos que sempre estiveram do meu lado mesmo nos momentos mais difíceis, depositando em mim a confiança e a força necessária para ultrapassar todos os obstáculos.

Aos meus pais, agradeço eternamente por tudo o que fizeram por mim e continuam a fazer, sem eles jamais seria possível chegar aqui e ser quem sou hoje.

E à minha namorada Tamiris, por todo o amor e apoio dado, e pela paciência que teve durante a elaboração desta dissertação.

palavras-chave

Pavimentos rodoviários, segurança rodoviária, atrito, textura, microtextura, macrotextura, mancha de areia

resumo

Na presente dissertação é estudada uma metodologia que possibilita a criação de modelos da superfície da camada de desgaste de pavimentos rodoviários, com base nos seus parâmetros composicionais.

O conhecimento das características superficiais dos pavimentos rodoviários por observação direta constitui um grande desafio, pelo que, é imprescindível conseguir métodos simples, que possibilitem a fácil obtenção de dados relativos a diferentes tipos de misturas betuminosas e estabeleçam correlações entre essas propriedades e a segurança rodoviária.

A interação entre o pneu e o pavimento é resultado de vários fatores, entre os quais, a aderência entre as duas superfícies. Uma boa interação pneu-pavimento é determinante para obter, uma circulação com o trajeto definido e uma boa resistência à derrapagem, essenciais para adequados processos de aceleração e travagem.

Baseado em formulações analíticas e gráficas foram determinados parâmetros granulométricos para três tipos de misturas betuminosas e, com base nesses parâmetros, foi possível determinar as percentagens de agregados, correspondentes a cada diâmetro esférico equivalente, e obter os índices físicos necessários para estabelecer a composição nos modelos.

Na elaboração dos modelos foram considerados os parâmetros composicionais que determinaram as características superficiais das misturas. Simulando por essa via as propriedades texturais (microtextura e macrotextura). Diferentes estados hídricos foram também considerados, traduzidos em lâminas de água de várias espessuras, para simular as propriedades dos pavimentos em diferentes estados, sem necessidade de recorrer à fabricação da mistura.

Por fim, foram elaborados vários modelos, simulando algumas situações que ocorrem durante a vida útil de um pavimento, como o desgaste do agregado e a presença de água na macrotextura. Conclui-se, que estes modelos podem ser utilizados no futuro para ajudar a analisar e perceber as melhores combinações de materiais, bem como controlar os parâmetros que permitam obter mais segurança rodoviária.

keywords

Road pavements, road safety, friction, texture, microtexture, macrotexture, mean texture depth

abstract

In this dissertation, a methodology that allows the conception of models, which represent the characteristics of the worn-out surface of road pavements based on its compositional parameters, is presented.

It is very difficult to know the surface characteristics of road pavements just by direct observation, so it is essential to find simple methods that collect data on mixtures that use different materials, and thus establish the relationship between their properties and safety.

The interaction between the tyre and the pavement is the result of several factors, like the grip between the two surfaces. A good tyre-pavement interaction is crucial to obtain a well-defined driving path, and it is also necessary to have some resistance to skidding and friction to be able to achieve adequate acceleration and braking processes.

The ideal granulometric spindle for three types of bituminous mixtures was determined based on analytical and graphic formulations. Based on this formulation, it was possible to determine the percentages of aggregates of different diameters present in the mixtures, and the necessary physical indices for the composition of the models too.

In the model design, the compositional parameters that determined the surface characteristics of the mixtures were considered by simulating the textural properties of the surface, such as microtexture, macrotexture and different water levels with different thicknesses, so that it is possible to study their properties without having to manufacture the mixture.

Finally, several models were developed to simulate some situations that occur during the pavement life cycle, such as worn-out aggregate and the presence of water in the macrotexture. It is concluded that these models can be used in the future to understand which combination of materials and parameters allow more road safety.

Índices

Índice Geral

Índice Geral	i
Índice de Figuras	v
Índice de Quadros	x
Abreviaturas	xi
Simbologia	xi
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estruturação da dissertação	2
2. Constituição de um pavimento rodoviário.....	7
2.1. Pavimentos Flexíveis.....	7
2.1.1. Funcionamento dos pavimentos flexíveis.....	8
2.2. Pavimentos Rígidos.....	9
2.3. Pavimentos Semi-rígidos.....	10
3. Misturas betuminosas para camada de desgaste.....	13
3.1. Tipologias das misturas betuminosas.....	14
3.2. Betão betuminoso.....	15
3.3. Betão betuminoso drenante.....	15
3.4. Betão betuminoso rugoso e micro-betão betuminoso rugoso.....	16
3.5. Tratamentos Superficiais.....	16
3.5.1. Microaglomerado betuminoso a frio.....	16
3.5.2. Revestimento superficial betuminoso.....	17
3.5.3. Lama asfáltica.....	17
4. Mecanismos de interação entre Pneu-Pavimento.....	21
4.1. Aderência pneu-pavimento.....	21
4.2. Deslizamento longitudinal e dinâmico do veículo.....	22
4.3. Hidroplanagem.....	23
4.4. Influência dos pneus.....	25

5.	Características superficiais dos pavimentos.....	29
5.1.	Textura superficial.....	30
5.1.1.	Microtextura.....	30
5.1.2.	Macrotextura.....	31
5.1.3.	Megatextura.....	31
5.1.4.	Irregularidade longitudinal e transversal.....	31
5.2.	Atrito.....	32
5.3.	Drenagem.....	33
5.4.	Ruído.....	34
5.5.	Características superficiais do pavimento e a segurança.....	35
5.6.	Gestão da película de água para estradas mais seguras.....	36
6.	Formulação de Misturas Betuminosas a Quente.....	43
6.1.	Considerações Iniciais.....	43
6.2.	Métodos por Especificação.....	43
6.3.	Métodos Analíticos.....	44
6.4.	Métodos Empíricos.....	44
6.5.	Métodos Volumétricos.....	45
6.6.	Métodos Racionais.....	45
7.	Modelação da macrotextura baseada nas características composicionais das misturas...	49
7.1.	Introdução.....	49
7.2.	Misturas estudadas.....	49
7.3.	Características das misturas.....	50
7.3.1.	Granulometria.....	50
7.3.2.	Índices Físicos.....	54
7.4.	Modelação da mistura.....	58
7.5.	Área de contacto pneu-pavimento.....	66
7.5.1.	Considerações Gerais.....	66
7.5.2.	Modelação da área de contacto.....	66
7.6.	Matriz.....	71
7.6.1.	Considerações gerais.....	71
7.6.2.	Modelação do material da matriz.....	72

8.	Modelação das texturas das superfícies das misturas	77
8.1.	Considerações gerais	77
8.2.	Materiais e simplificações adotadas	77
8.3.	Modelação da superfície da mistura BB	78
8.3.1.	Modelo de uma mistura BB sem desgaste com MTD = 0,5 mm.....	79
8.3.2.	Modelo de uma mistura BB sem desgaste com MTD = 0,8 mm.....	80
8.3.3.	Modelo de uma mistura BB sem desgaste com MTD = 1,0 mm.....	82
8.3.4.	Modelo de uma mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm	83
8.3.5.	Modelo de uma mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e com uma película de água a 10 % da macrotextura.....	85
8.3.6.	Modelo de uma mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e com uma película de água a 50 % da macrotextura.....	87
8.3.7.	Modelo de uma mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e com uma película de água a 100 % da macrotextura.....	89
8.3.8.	Modelo de uma mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e com uma película de água a 120 % da macrotextura.....	91
8.4.	Modelação de uma mistura mBBR.....	93
8.4.1.	Modelo de uma mistura mBBR sem desgaste com MTD = 0,5 mm	93
8.4.2.	Modelo de uma mistura mBBR sem desgaste com MTD = 0,8 mm	95
8.4.3.	Modelo de uma mistura mBBR sem desgaste com MTD = 1,0 mm	96
8.4.4.	Modelo de uma mistura mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm.....	98
8.4.5.	Modelo de uma mistura mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100%.....	99
8.5.	Modelação de uma mistura BBD.....	101
8.5.1.	Modelo de uma mistura BBD sem desgaste com um MTD = 0,5 mm	101
8.5.2.	Modelo de uma mistura BBD sem desgaste com um MTD = 0,8 mm	103
8.5.3.	Modelo de uma mistura BBD sem desgaste com MTD = 1,0 mm	104
8.5.4.	Modelo de uma mistura BBD com desgaste de 0,3 mm e MTD = 0,7 mm.....	106
8.5.5.	Modelo de uma mistura BBD com um desgaste de 0,3 mm e MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100%.....	107

9.	Conclusões e Trabalhos futuros	113
9.1	Conclusões principais	113
9.2.	Propostas futuras	114
10.	Referências bibliográficas.....	117

Índice de Figuras

Figura 1- Estrutura tipo cada pavimento	10
Figura 2 - Mecanismo de adesão, histerese e desgaste (Silva, 2009).....	21
Figura 3 - Representação gráfica da hidroplanagem (Silva, 2008).....	23
Figura 4 - Constituição de um pneu (a) e do respetivo piso (b).....	25
Figura 5 – Representação esquemática do contacto pneu em movimento com o pavimento molhado (Adaptado de Kraemer et al., 2004).....	29
Figura 6 - As irregularidades da superfície de um pavimento (Adaptado de AIPCR / PIARC, 2003)	30
Figura 7 – Variação do coeficiente de atrito (a) com a profundidade da água (b) (Adaptado de Do et al., 2013).....	37
Figura 8 – Efeitos da velocidade na curva atrito/profundidade da água; (a) Espécime S590-E0; (b) Espécime S590-E3 (Adaptado de Do et al., 2013).....	38
Figura 9 - Definição da altura critica de água (Adaptado de Do et al., 2013)	39
Figura 10 - Efeitos da microtextura na curva atrito/profundidade de água	40
Figura 11 – Curva granulométrica escolhida para o Betão Betuminoso	52
Figura 12 – Curva granulométrica escolhida para o Betão Betuminoso Drenante	52
Figura 13 – Curva granulométrica escolhida para o Micro-betão Betuminoso Rugoso	53
Figura 14 - Composição de uma mistura.....	54
Figura 15 - Representação volumétrica das composições das misturas em estudo	57
Figura 16 – Determinação dos diâmetros esféricos equivalentes na curva de granulometrias da mistura BB.....	59
Figura 17 – Determinação dos diâmetros esféricos equivalentes na curva de granulometrias da mistura mBBR	59
Figura 18 – Determinação dos diâmetros esféricos equivalentes na curva de granulometrias da mistura BBD.....	60
Figura 19 – Procedimento para a obtenção do provete no Programa Solidworks	63
Figura 20 – Representação gráfica do provete da mistura betão betuminoso.....	64
Figura 21 – Representação gráfica do provete da mistura micro-betão rugoso.....	64

Figura 22 – Representação gráfica do provete da mistura betão betuminoso drenante	65
Figura 23 - Texturas de pavimentos reais dos diferentes tipos de misturas (mistura BB (a), mistura mBBR (b) e mistura BD (c))	65
Figura 24 – Procedimento para a realização do ensaio mancha de areia	67
Figura 25 – Representação do ensaio mancha de areia com o arranjo dos grãos de areia	68
Figura 26 – Corpo de agregado	68
Figura 27 – Plano paralelo ao plano médio do agregado a 0,200 mm do topo.....	69
Figura 28 – Corpo de agregado intersetado pelos dois planos paralelos ao plano da superfície (Plano verde corresponde a superfície)	69
Figura 29 – Espaço correspondente aos vazios entre as partículas de agregado	70
Figura 30 – Área de contacto entre o pneu e o pavimento (primeira área de interação a cinza escuro).....	70
Figura 31 – Representação do agregado cortado pelo plano da macrotextura (MTD)	71
Figura 32 – Matriz e agregado.....	72
Figura 33 – Agregados parcialmente encrostados na matriz	72
Figura 34 – Agregados grossos embebidos na matriz fina.....	73
Figura 35 – Agregados totalmente embebidos na matriz, com corte pelo plano MTD.....	73
Figura 36 – Modelo do pavimento geral no programa Ansys	77
Figura 37 – Representação da matriz e do agregado no modelo	78
Figura 38 – Condições do modelo BB sem desgaste com MTD = 0,5 mm	79
Figura 39 – Planta do modelo da mistura BB sem desgaste com MTD = 0,5 mm	79
Figura 40 - Vista em perspetiva do modelo da mistura BB sem desgaste com MTD = 0,5 mm.	80
Figura 41 - Condições do modelo BB sem desgaste com MTD = 0,8 mm	80
Figura 42 - Planta do modelo da mistura BB sem desgaste com MTD = 0,8 mm.....	81
Figura 43 - Vista em perspetiva do modelo da mistura BB sem desgaste com MTD = 0,8 mm.	81
Figura 44 - Condições do modelo BB sem desgaste com MTD = 1,0 mm	82
Figura 45 - Planta do modelo da mistura BB sem desgaste com MTD = 1,0 mm.....	82
Figura 46 - Vista em perspetiva do modelo da mistura BB sem desgaste com MTD = 1,0 mm.	83

Figura 47 - Condições do modelo BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm	83
Figura 48 - Planta do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm	84
Figura 49 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm	84
Figura 50 - Vista aproximada dos cabeços do agregado com desgaste.....	85
Figura 51 - Condições do modelo BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 10 % da macrotextura	85
Figura 52 - Planta do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 10 % da macrotextura	86
Figura 53 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 10 % da macrotextura	86
Figura 54 - Vista aproximada dos cabeços do agregado com desgaste e uma película de água a 10 % da macrotextura na mistura BB	87
Figura 55 - Condições do modelo BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 50 % da macrotextura	87
Figura 56 - Planta do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 50 % da macrotextura	88
Figura 57 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 10 % da macrotextura	88
Figura 58 - Vista aproximada dos cabeços do agregado com desgaste e uma película de água a 50 % da macrotextura na mistura BB	89
Figura 59 - Condições do modelo BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100 % da macrotextura	89
Figura 60 - Planta do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100 % da macrotextura	90
Figura 61 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100 % da macrotextura	91
Figura 62 - Vista aproximada dos cabeços do agregado com desgaste e uma película de água a 100 % da macrotextura na mistura BB.....	91
Figura 63 - Condições do modelo BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 120 % da macrotextura	91
Figura 64 - Planta do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 120 % da macrotextura	92

Figura 65 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 120 % da macrotextura	93
Figura 66 - Vista aproximada dos cabeços do agregado com desgaste e uma película de água a 120 % da macrotextura na mistura BB.....	93
Figura 67 - Condições do modelo mBBR sem desgaste com MTD = 0,5 mm.....	93
Figura 68 - Planta do modelo da mistura mBBR sem desgaste com MTD = 0,5 mm	94
Figura 69 - Vista em perspectiva do modelo da mistura mBBR sem desgaste com MTD = 0,5 mm	94
Figura 70 - Condições do modelo mBBR sem desgaste com MTD = 0,8 mm.....	95
Figura 71 - Planta do modelo da mistura mBBR sem desgaste com MTD = 0,8 mm	95
Figura 72 - Vista em perspectiva do modelo da mistura mBBR sem desgaste com MTD = 0,8 mm	96
Figura 73 - Condições do modelo mBBR sem desgaste com MTD = 1,0 mm.....	96
Figura 74 - Planta do modelo da mistura mBBR sem desgaste com MTD = 1,0 mm	97
Figura 75 - Vista em perspectiva do modelo da mistura mBBR sem desgaste com MTD = 1,0 mm	97
Figura 76 - Condições do modelo mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm	98
Figura 77 - Planta do modelo da mistura mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm	98
Figura 78 - Vista em perspectiva do modelo da mistura mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm	99
Figura 79 - Condições do modelo mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura	99
Figura 80 - Planta do modelo da mistura mBBR com desgaste a 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura.....	100
Figura 81 - Vista em perspectiva do modelo da mistura mBBR com desgaste 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura	100
Figura 82 - Corte da mistura mBBR com a película de água a 100%	101
Figura 83 - Condições do modelo BBD sem desgaste com MTD = 0,5 mm	101
Figura 84 - Planta do modelo da mistura BBD sem desgaste com MTD = 0,5 mm	102

Figura 85 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BBD sem desgaste com MTD = 0,5 mm	102
Figura 86 - Condições do modelo BBD sem desgaste com MTD = 0,8 mm	103
Figura 87 - Planta do modelo da mistura BBD sem desgaste com MTD = 0,8 mm	103
Figura 88 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BBD sem desgaste com MTD = 0,8 mm	104
Figura 89 - Condições do modelo BBD sem desgaste com MTD = 1,0 mm	104
Figura 90 - Planta do modelo da mistura BBD sem desgaste com MTD = 1,0 mm	105
Figura 91 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BBD sem desgaste com MTD = 1,0 mm	105
Figura 92 - Condições do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm	106
Figura 93 - Planta do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm	106
Figura 94 - Vista em perspectiva do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm	107
Figura 95 - Condições do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura	107
Figura 96 - Planta do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura	108
Figura 97 - Vista em perspectiva do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura	108
Figura 98 - Corte do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura	109

Índice de Quadros

Quadro 1 - Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Adaptado de Branco et al. 2016).....	7
Quadro 2 - Designação atual das misturas betuminosas segundo a NP EN 13108-1: Anexo Nacional	14
Quadro 3 – Fuso granulométrico a respeitar para camada de desgaste em cada mistura.....	50
Quadro 4 - Granulometria dos agregados a utilizar	51
Quadro 5 - Combinações percentuais utilizadas para cada tipo de mistura	53
Quadro 6 – Dados iniciais utilizados para cada tipo de mistura	56
Quadro 7 – Propriedades das misturas em estudo	57
Quadro 8 – Diâmetros esféricos equivalentes para o Betão Betuminoso.....	60
Quadro 9 – Diâmetros esféricos equivalentes para o Betão Betuminoso Drenante.....	61
Quadro 10 – Diâmetros esféricos equivalentes para o Micro-Betão Betuminoso Rugoso.....	61
Quadro 11 - Número de esferas para um provete de 50 mm de raio para uma mistura de Betão Betuminoso.....	62
Quadro 12- Número de esferas para um provete de 50 mm de raio para uma mistura de Betão Betuminoso Drenante.....	62
Quadro 13- Número de esferas para um provete de 50 mm de raio para uma mistura de Micro-betão Betuminoso Rugoso.....	62
Quadro 14 – Características adotadas para o carregamento	78

Abreviaturas

BB	Betão betuminoso denso
BBD	Betão betuminoso drenante
mBBR	Microbetão betuminoso rugoso
MTD	Profundidade média da textura superficial

Simbologia

Ma	Massa de material agregado
Mb	Massa de betume
Mt	Massa total
n	Porosidade
va	Percentagem volumétrica de agregado em relação ao volume total
vb	Percentagem volumétrica de betume em relação ao volume total
Va	Volume de agregado
Vb	Volume de betume
Vt	Volume total
Vv	Volume de vazios
tb	Teor em betume (cociente entre a massa de betume com a massa de agregado seco)
pa	Percentagem de agregado (em relação à massa total) numa mistura betuminosa
pb	Percentagem de betume (em relação à massa total) numa mistura betuminosa
ρ_b	Massa volúmica do betume componente numa mistura betuminosa
ρ_s	Massa volúmica das partículas componente numa mistura betuminosa
ρ_t	Massa volúmica numa mistura betuminosa
$\rho_{máx}$	Massa volúmica “máxima” (ou teórica) numa mistura betuminosa
D ₃₀	Diâmetro equivalente do agregado correspondente a 30% de passados
D ₄₀	Diâmetro equivalente do agregado correspondente a 40% de passados
D ₅₀	Diâmetro equivalente do agregado correspondente a 50% de passados
D ₆₀	Diâmetro equivalente do agregado correspondente a 60% de passados
D ₇₀	Diâmetro equivalente do agregado correspondente a 70% de passados
D ₈₀	Diâmetro equivalente do agregado correspondente a 80% de passados
D ₉₀	Diâmetro equivalente do agregado correspondente a 90% de passados

Capítulo 1

Introdução

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

As vias de comunicação são infraestruturas fundamentais para o progresso e desenvolvimento económico de qualquer região. Cada vez mais o ser humano tem a necessidade de se deslocar e percorrer grandes distâncias no menor intervalo de tempo possível. Porém nem sempre os pavimentos garantem as melhores condições para uma circulação em segurança. Nas últimas décadas tem se progredido muito no sentido de obter materiais e soluções construtivas que permitam minimizar os riscos de acidentes e aumentar a segurança e comodidade dos utilizadores.

Apesar do avanço tecnológico alcançado no estudo da interação pneu-pavimento, a maior parte desse conhecimento adquirido é relativo ao comportamento do pneu quando em contacto com o pavimento. Frequentemente, neste tipo de estudo o pavimento é reduzido a um coeficiente de atrito, desvalorizando-se outras características e parâmetros que estão intrinsecamente ligados aos pavimentos. É então imprescindível aprofundar o conhecimento destas características funcionais, pois só através da compreensão do seu comportamento é possível produzir misturas capazes de otimizar o desempenho funcional do pavimento, em especial as camadas de desgaste.

O dimensionamento dos pavimentos é geralmente centrado na sua capacidade estrutural e durabilidade, sendo o desempenho funcional, ao nível da camada de desgaste, considerado indiretamente através das características dos materiais constituintes. Desta forma é importante integrar parâmetros como coeficientes de atrito (transversal e longitudinal), macrotextura e microtextura, porosidade, estado hídrico do pavimento e geometria do traçado no estudo da interação pneu-pavimento para alcançar resultados e dados mais próximos da realidade e assim garantir soluções mais eficazes para garantir melhores desempenhos nas estradas.

1.2. Objetivos

Este estudo tem como objetivo ajudar a uma melhor compreensão do comportamento da interação entre o pneu e pavimento, de forma a avaliar o seu desempenho em função da mistura utilizada na camada de desgaste.

Assim, propõe-se desenvolver nesta dissertação de mestrado um modelo, implementável num programa de cálculo, que permita obter dados mais realistas acerca do desempenho da camada de desgaste baseado em parâmetros funcionais como: coeficientes de atrito (transversal e longitudinal), porosidade das misturas, macrotextura e microtextura.

As conclusões obtidas neste estudo contribuirão para o desenvolvimento de misturas que potenciem uma maior segurança e conforto na circulação de veículos.

1.3. Estruturação da dissertação

Esta dissertação está dividida em 8 capítulos, sendo o primeiro a introdução no qual é apresentado o tema em estudo, bem como o seu enquadramento e os objetivos pretendidos ao longo do trabalho.

No capítulo 2, é apresentado um pequeno resumo da constituição dos principais pavimentos rodoviários, pavimentos flexíveis, rígidos e semi-rígidos. Dando maior importância aos pavimentos flexíveis uma vez que serão estes o alvo do estudo desta dissertação.

No capítulo 3, são apresentadas as principais misturas betuminosas para camada de desgaste utilizadas nos pavimentos flexíveis. Aqui é feito um resumo das características de cada mistura, sendo elas o betão betuminoso, o betão betuminoso drenante e micro-betão betuminoso rugoso.

No capítulo 4, é descrito de forma sucinta os mecanismos de interação entre pneu pavimento, onde são abordados alguns fenômenos que afetam de forma relevante a dinâmica da interação entre o pneu e a camada superficial do pavimento.

No capítulo 5, apresenta-se as características superficiais dos pavimentos, onde é feito um resumo das suas características e a influencia que estas têm na superfície do pavimento. Neste capítulo é ainda referido a importância da macrotextura e da microtextura na segurança rodoviária quando a presença de películas de água.

No capítulo 6, é apresentada a metodologia de modelação da macrotextura baseada nas características composicionais das misturas betuminosas, onde é descrito o processo de obtenção de um modelo capaz de reproduzir as características superficiais dos pavimentos num programa de cálculo.

No capítulo 7, são expostos alguns modelos de textura da superfície das misturas estudadas.

No capítulo 8 faz-se uma conclusão sobre o objetivo desta dissertação, bem como algumas propostas para trabalhos futuros que possam complementar este estudo.

Capítulo 2

Constituição de um pavimento rodoviário

2. CONSTITUIÇÃO DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO

Os pavimentos rodoviários são estruturas construídas em camadas com espessuras definidas que apoiam sobre uma fundação. Do ponto de vista estrutural e funcional os pavimentos são dimensionados, técnica e economicamente, de forma a resistir aos esforços provenientes das ações do tráfego e do clima para proporcionar melhores condições de circulação. Dependendo do tipo de materiais utilizados nas camadas é possível diferenciar os pavimentos recorrendo a dois critérios, os materiais utilizados na sua construção e a sua deformabilidade, como descrito no Quadro 1 (Branco et al., 2016).

Quadro 1 - Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Adaptado de Branco et al. 2016)

<i>Tipos de pavimentos</i>	<i>Materiais (ligante)</i>	<i>Deformabilidade</i>
Flexíveis	Hidrocarbonados e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semi-rígido	Hidrocarbonados, hidráulicos e granulares	Reduzida

2.1. Pavimentos Flexíveis

Os pavimentos flexíveis são caracterizados pela utilização de misturas betuminosas, como o betume asfáltico, nas suas camadas de desgaste. Por norma este tipo de pavimento tem pelo menos duas camadas ligadas por materiais betuminosos, a camada de regularização e de desgaste. A camada de desgaste tem como função oferecer uma superfície regular e resistente aos efeitos de abrasão provocados pela circulação dos veículos (Branco et al., 2016).

A camada de regularização funciona com uma espécie de base da camada de desgaste. Esta serve para garantir uma boa execução da camada superior e uniformizar as tensões que surgem das ações aplicada pelos veículos e transmiti-las à camada de base. Neste tipo de pavimento, e do ponto de vista estrutural, as camadas de base e de sub-base têm um

papel importante, pois são elas que têm a função de absorver e resistir às tensões que chegam provenientes das camadas superiores (Branco et al., 2016).

São camadas formadas por materiais granulares não ligados, mas estabilizadas mecanicamente. Já a camada de sub-base, tem a função de transmitir os esforços para a fundação, mas também de oferecer uma barreira de drenagem de água que se infiltre na estrutura e evitar que ocorram fenómenos de capilaridade (Branco et al., 2016; Reis, 2009).

2.1.1. Funcionamento dos pavimentos flexíveis

Para o estudo que se pretende realizar interessam sobre tudo os pavimentos flexíveis, uma vez que são estes os mais utilizados. A constituição dos pavimentos flexíveis depende de vários fatores, o que leva a que estes tenham uma grande diversidade. A sua estrutura é então estabelecida tendo em conta a intensidade de tráfego a que o pavimento está sujeito, as características dos materiais que compõem as camadas e também da capacidade resistente do solo de fundação. Desta maneira, é possível estabelecer uma relação quanto à intensidade do tráfego, à qualidade dos materiais granulares disponíveis e à capacidade de suporte da fundação (Branco et al., 2016).

Quando o tráfego é de grande intensidade e a qualidade dos materiais granulares é boa e de baixo custo, podem ser dimensionados pavimentos onde é predominante a componente granular. No caso do material granular disponível ser de fraca qualidade, elevado custo, e/ou o solo de fundação não apresentar boa capacidade resistente, será necessário considerar um pavimento no qual são integradas várias camadas betuminosas com uma espessura total considerável (Branco et al., 2016).

É muito importante que as várias camadas betuminosas dos pavimentos flexíveis fiquem bem coladas entre si, funcionando como uma camada única, para que desta forma as tensões de compressão máxima ocorram na camada de desgaste e as tensões de tração máxima ocorram na face inferior da última camada ligada. Caso não funcionem como uma só, isto é, não fiquem ligadas entre si, as tensões máximas de compressão e tração vão ocorrer na face superior e na face inferior de cada uma, o que irá contribuir para uma aceleração da degradação do pavimento (Branco et al., 2016).

2.2. Pavimentos Rígidos

Os pavimentos rígidos são caracterizados pela utilização de material granular com ligantes hidráulicos na camada superior e com material granular com ou sem o ligante hidráulico nas camadas inferiores. Este tipo de pavimento pode ser constituído por betão simples, pré-esforçado, com fibras, compactado a rolo ou de alta resistência. Como consequência da utilização de ligantes hidráulicos nas suas camadas, este tipo de pavimento tem uma grande capacidade para suportar deformações, mesmo quando submetido a grandes volumes de tráfego (Branco et al., 2016).

Por ser um pavimento com um grau de rigidez muito elevado, a ação vertical provocada pela pressão de contacto dos pneus é absorvida ao longo das camadas, pelo que a tensão vertical que atinge o solo de fundação é muito baixa. Assim, a camada de sub-base, ao contrário do que acontece no pavimento flexível, não tem necessidade de ter elevada capacidade de resistência, mas sim garantir uma base estável e regular que permita uma boa excussão da camada de desgaste, quer em fase de obra ou no período de exploração. É muito importante que a fundação seja constituída por material homogéneo para garantir um apoio estável da laje (camada de desgaste) do pavimento (Menezes, 2008).

Em alguns casos o solo de fundação não garante as condições necessárias para a estabilização do pavimento pelo que é importante executar um leito de pavimento. Nestas estruturas é habitual o aparecimento de fendas, provocadas pela retração do betão enquanto ocorre o seu endurecimento. De forma a contrariar este fenómeno, é necessário proceder a certos métodos construtivos específicos. O mais utilizado é a aplicação de juntas de dilatação, pouco espaçadas entre si, com o objetivo de dividir o pavimento em painéis. Assim as juntas têm a capacidade de absorver dilatações e as retrações que ocorrem nos painéis provocadas pelos diferenciais de temperatura (Branco et al., 2016; Menezes, 2008).

2.3. Pavimentos Semi-rígidos

Os pavimentos semi-rígidos possuem características semelhantes aos anteriores uma vez que apresentam duas camadas superiores (camada de desgaste e de regularização) constituídas por misturas betuminosas. A principal distinção deste tipo de pavimento para os anteriores é na camada de base. É esta camada, composta por material granular estabilizado com ligante hidráulico, que tem a função de suportar a maioria do esforço vertical aplicado sobre o pavimento. Por ter um elevado grau de rigidez, a camada de base tem capacidade de diminuir as ações que chegam ao solo de fundação (Branco et al., 2016).

No entanto, à semelhança dos pavimentos rígidos, onde na camada de base é utilizado cimento, surge fendilhamento transversal devido à retração do betão. Este fenómeno ocorre em intervalos de 3 a 5 metros, provocando uma descontinuidade na estrutura que com a ação da circulação dos veículos propaga-se para as camadas betuminosas. É então importante para este tipo de pavimento utilizar-se métodos construtivos capazes de impedir e retardar a propagação do fendilhamento da camada de base para as camadas betuminosas (Branco et al., 2016).

Com o objetivo de retardar a degradação do pavimento é habitual a aplicação de geotêxtis impregnados com betume ou com a aplicação de pequenas camadas de argamassa betuminosa (Branco et al., 2016). Na figura 3 são representadas as principais camadas de cada pavimento.

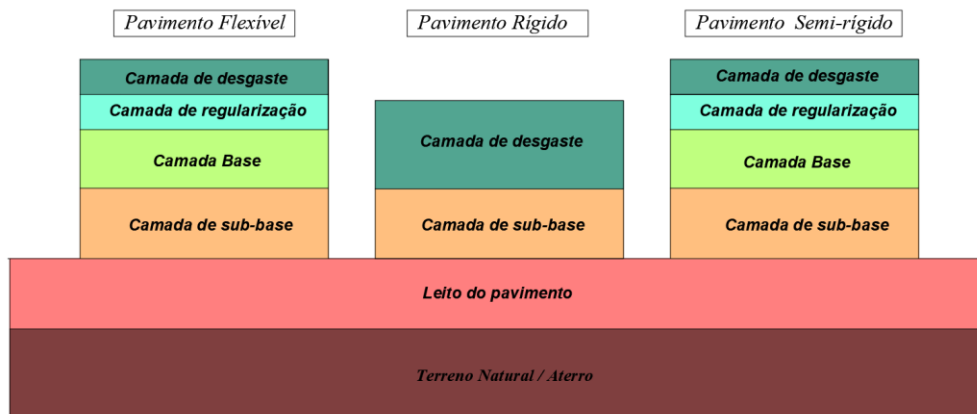


Figura 1- Estrutura tipo cada pavimento

Capítulo 3

Misturas betuminosas para camada de desgaste

3. Misturas betuminosas para camada de desgaste

Os pavimentos flexíveis apresentam na sua camada de desgaste dois tipos de composição, misturas betuminosas ou misturas com ligantes hidráulicos. No panorama nacional e também a nível mundial as misturas betuminosas aparecem como o material de eleição. É necessário que a camada de desgaste apresente um determinado conjunto de características de adesão e resistência, de forma a garantir a mobilização de atrito, quer em piso seco ou molhado (Menezes, 2008).

Também o nível de ruído deve ser limitado ao intervalo adequado, devendo ter uma superfície regular, desempenada e uma macrotextura que possibilite o bom escoamento da água. Em pavimentos flexíveis é muito usual utilizar misturas betuminosas fabricadas a quente nas camadas de desgaste, mas também é usado a frio para reparações de pavimentos ou em obras com um volume de tráfego menor (Menezes, 2008).

As misturas betuminosas fabricadas a frio são executadas sem aquecimento dos materiais, pelo que podem ser aplicadas à temperatura ambiente devido à utilização de emulsões betuminosas e são, geralmente, usadas em pavimentos com baixo volume de tráfego. As misturas betuminosas fabricadas a quente, são produzidas em centrais onde existe aquecimento do agregado e do ligante betuminoso de forma a possibilitar o manuseamento (espalhamento e compactação) da mistura durante a sua aplicação (Menezes, 2008).

Nos pontos seguintes, apresentam-se sucintamente as principais tipologias de misturas betuminosas utilizadas em camadas superficiais de pavimentos rodoviários (camadas de desgaste).

3.1. Tipologias das misturas betuminosas

As misturas betuminosas são classificadas consoante a função estrutural que desempenham nas diferentes camadas dos pavimentos. De modo a normalizar as designações de todas as misturas betuminosas de acordo com a sua função, foi criada uma norma Europeia - NP EN 13108-1 (2011) - com o objetivo de uniformizar essa classificação. Para facilitar o entendimento entre os vários Estados-Membros da Comunidade Europeia, o Organismo de Normalização Nacional – Instituto Português da Qualidade, recomendou que deveriam ser mantidas as abreviaturas em inglês (Tavares, 2016).

A norma NP EN 13108-1 (2011) define os requisitos para as misturas betuminosas fabricadas a quente e podem ser designadas conforme indicado no Quadro 2:

Quadro 2 - Designação atual das misturas betuminosas segundo a NP EN 13108-1: Anexo Nacional

Camada	Designação anterior	Designação actual
Base	Macadame Betuminoso Fuso B	AC 32 base ligante (MB)
	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 base ligante (MB)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)
Ligação	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 bin ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 bin ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 bin ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso Subjacente	AC 14 bin ligante (BBsb)
Regularização⁽¹⁾	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 reg ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 reg ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso Subjacente	AC 14 reg ligante (BBsb)
	Betão Betuminoso	AC 14 reg ligante (BB)
Desgaste	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr)
	(micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (BBr)

⁽¹⁾ A EN13108-1 contempla a aplicação de misturas betuminosas na camada de regularização do pavimento, contudo não indica a designação a adoptar para esta aplicação. Recomenda-se assim a adopção da abreviatura "reg" referente à camada de regularização cujo termo em inglês é *regulating course*.

Na identificação da mistura betuminosa e a título de exemplo, o betão betuminoso tem a seguinte designação:

AC ; D ; Surf / Base / Reg / Bin ; Ligante

Em que,

- AC – Betão Betuminoso, em Inglês é *Asphalt Concrete*;
- D – Dimensão correspondente à abertura do peneiro superior com material retido;
- Surf – Camada de desgaste;
- Base – Camada base;
- Bin – Camada de ligante;
- Reg – Camada de regularização;
- Ligante – Designação do ligante utilizado.

3.2. Betão betuminoso

O betão betuminoso, AC 14 surf ligante (BB), é uma mistura produzida a quente muito utilizada em camadas de desgaste. Tem como principais características ser pouco permeável e bastante resistente ao desgaste por ação do tráfego. Por ser uma mistura com uma macrotextura relativamente baixa, não é a mais indicada para estradas com velocidades elevadas onde o clima seja potencialmente mais chuvoso. Os agregados que formam este tipo de mistura têm uma dimensão máxima de 14 mm (Menezes, 2008).

3.3. Betão betuminoso drenante

O betão betuminoso drenante, AC 14 surf ligante (BBD), é uma mistura betuminosa aberta, isto é, com uma elevada porosidade com espessuras de cerca de 4 cm. Esta mistura usada na camada de desgaste, permite que a drenagem da água que atinge o pavimento ocorra através do interior da camada superficial e não à superfície. Esta maior porosidade da mistura permite garantir mais segurança e comodidade de circulação em períodos de chuva, diminuindo fenómenos de hidroplanagem e ruído. Contudo esta particularidade faz com que tenha uma menor resistência aos efeitos abrasivos do tráfego. Esta mistura não é recomendada para locais com baixa pluviosidade, uma vez que, a sujidade e os detritos provenientes dos veículos podem ficar alojados nos vazios da macrotextura.

Consequentemente, a propriedade de drenagem particular deste tipo de mistura é perdida, originando problemas de aderência entre o pneu e o pavimento (Branco et al., 2016; Tavares, 2013).

3.4. Betão betuminoso rugoso e micro-betão betuminoso rugoso

O micro-betão rugoso, AC 10 surf (mBBR), é uma mistura que é aplicada em autoestradas, onde existe um elevado tráfego de pesados. Por oferecer uma boa macrotextura, proporciona uma condução segura com o pavimento molhado. Ao contrário do betão betuminoso drenante, esta mistura é fechada, por isso a sua drenagem ocorre na superfície do pavimento, evitando assim problemas de obstrução nos poros causados por sujidade, não alterando a segurança dos utilizadores (Duarte, 2011).

O betão betuminoso rugoso com borracha é um tipo de mistura na qual é adicionado fragmentos de borracha provenientes da reciclagem de pneus. Ao adicionar a borracha na mistura é possível melhorar a capacidade estrutural e funcional do pavimento, aumentando a sua flexibilidade, diminuindo problemas de fendilhamento por fadiga e aumentando a resistência ao desgaste por ação do tráfego (Duarte, 2011).

3.5. Tratamentos Superficiais

O tratamento superficial consiste na aplicação de uma pequena camada com dimensões muito reduzidas a fim de melhorar certas características da superfície como a textura e a impermeabilidade. Estes tratamentos não têm o objetivo de melhorar o desempenho estrutural, mas sim potenciar as características funcionais das camadas de desgaste. Trata-se de uma pequena camada que pode ser inferior a 1 cm, mas nunca superior a 4 cm de espessura. (Branco et al., 2016).

3.5.1. Microaglomerado betuminoso a frio

Este tipo de mistura é um tratamento superficial executado com recurso a emulsões betuminosas modificadas com polímeros, de maneira a garantir fluidez suficiente para ser manuseado a frio. No fabrico desta mistura são usados materiais de granulometria contínua 0/6 e devem ter boa resistência à abrasão. É uma solução de manutenção

económica, que quando devidamente implementada através de sistemas de gestão de pavimentação, contribui para o significativo prolongamento da vida útil dos pavimentos (Simões et al., 2017).

As camadas de desgaste que são executadas com esta mistura podem ser aplicadas de forma simples ou dupla, alterando o número de camadas, dos fusos granulométricos e da dimensão máxima do agregado para cada uma delas. Como é um método aplicado a frio, a abertura de uma estrada sujeita a este tipo de tratamento é mais rápida (Branco et al., 2016; Duarte, 2011).

3.5.2. Revestimento superficial betuminoso

O revestimento superficial betuminoso é um tratamento superficial que tem como objetivo garantir as características funcionais da superfície, ao contrário dos outros tratamentos, desta resulta uma camada com uma espessura maior. É executada em duas fases distintas, na primeira fase o ligante é espalhado com o recurso a emulsões betuminosas e posteriormente, na segunda fase, o agregado é adicionado e compactado sobre a camada de ligante para que permaneça misturado com este (Duarte, 2011).

Este tratamento pode ainda ser executado de outra forma, na qual o ligante é aplicado sobre uma camada de agregados e depois de compactado volta-se a repetir todo o processo com aplicação de uma nova camada de agregado com ligante e respetiva compactação (J. Silva, 2008).

3.5.3. Lama asfáltica

A lama asfáltica, *Slurry Seal*, é um tratamento superficial idêntico ao microaglomerado betuminoso a frio, porém não tem a necessidade da utilização de emulsões betuminosas alteradas com polímeros. Este tipo de tratamento permite reparar anomalias existentes na camada de desgaste, como fendas e outras imperfeições que prejudicam a impermeabilidade da camada e a segurança da circulação de veículos. Este tipo de solução pode ser aplicada recorrendo à utilização de emulsões betuminosas modificadas para aumentar a sua eficácia, conseguindo assim possibilitar a circulação de veículos mais rapidamente (Duarte, 2011).

Capítulo 4

Mecanismos de interação entre Pneu-Pavimento

4. Mecanismos de interação entre Pneu-Pavimento

Neste capítulo são abordados alguns fenômenos que afetam de forma relevante a dinâmica da interação entre o pneu e a camada superficial do pavimento. É, portanto, a nível da camada de desgaste que estes fenômenos têm expressão, sendo muito importante conhecer bem os seus efeitos.

4.1. Aderência pneu-pavimento

Desde logo a característica mais relevante quando pensamos na interação pneu-pavimento é sem dúvida a aderência entre o pneu e o pavimento. Para que o veículo possa ter uma trajetória bem definida é necessário que o pavimento mobilize alguma resistência à derrapagem e fricção (Silvério, 2015).

O atrito gerado entre o pneu e o pavimento ocorre devido à adesão e à histerese¹ na área de contacto, sendo que ambos os conceitos estão relacionados com a velocidade (Wilson, 2006). O conceito de adesão é um fenómeno que ocorre a nível molecular onde as partículas do agregado se ligam às partículas de borracha do pneu. Já a histerese acontece devido à deformação do pneu sobre a superfície do pavimento (Hamersma & Els, 2014).

Na Figura 2 está representado o funcionamento dos fenómenos acima descritos.

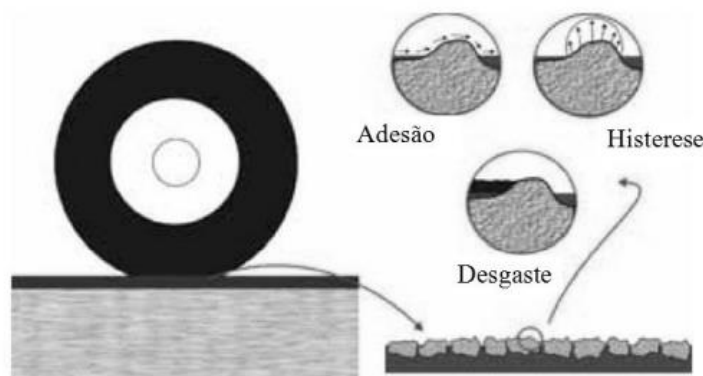


Figura 2 - Mecanismo de adesão, histerese e desgaste (Silva, 2009)

¹Histerese é a capacidade de um material manter as suas propriedades mesmo sem haver continuidade dos estímulos que as provocaram.

A força de histerese ocorre na área de contacto entre o pneu e a superfície do pavimento, quando as ranhuras da borracha se envolvem com a superfície do agregado. De forma simplificada, este fenómeno consiste num amontoar da borracha nas extremidades das irregularidades do pavimento durante o deslocamento, fazendo com que exista perda de contacto na face inferior. Como o bolbo de pressões se distribui assimetricamente devido às irregularidades é criada uma força que se opõe ao deslocamento designada por histerese. Esta força é controlada pela macrotextura da superfície que causa a perda de energia do sistema sob forma de calor e ruído (Couchinho, 2011; Wilson, 2006).

A adesão é originada exclusivamente a nível molecular onde as moléculas de borracha produzem forças adesivas com as moléculas do pavimento, criando fricção entres as duas superfícies. Esta força adesiva é tanto maior quanto maior for a microtextura, a temperatura e o tempo de contacto (Pereira et al., 2012).

A água é um elemento problemático para este fenómeno pois impede a criação de ligações químicas entres as duas superfícies, pelo que, como consequência, num pavimento molhado há uma redução drástica da capacidade de adesão, o que resulta numa diminuição do atrito. Assim, em condições onde há a presença de água a componente da histerese é a que mais contribui para gerar resistência à derrapagem e garantir uma boa estabilidade do veículo (Silvério, 2015; Wilson, 2006).

4.2. Deslizamento longitudinal e dinâmico do veículo

Durante a deslocação de um veículo, são transmitidas forças normais à superfície da estrada (forças verticais) e forças paralelas (forças horizontais) entre o pneu e o pavimento. As forças horizontais são projetadas na direção tangencial, paralelamente ao percurso de deslocamento do veículo, ou na direção radial, perpendicular ao trajeto de marcha do veículo (Silvério, 2015).

4.3. Hidroplanagem

A hidroplanagem é um fenómeno onde ocorre a perda de contacto entre o pneu e o pavimento devido a uma camada de água existente na superfície do pavimento. Esta perda de aderência acontece pela incapacidade da água em se expelir, ficando desta forma pressionada entre o pneu e o pavimento, provocando assim pressões hidrodinâmicas que resultam numa elevada diminuição da fricção entre o pneu e o pavimento (Soares, 2011).

Este fenómeno pode ser observado na representação gráfica da Figura 3.

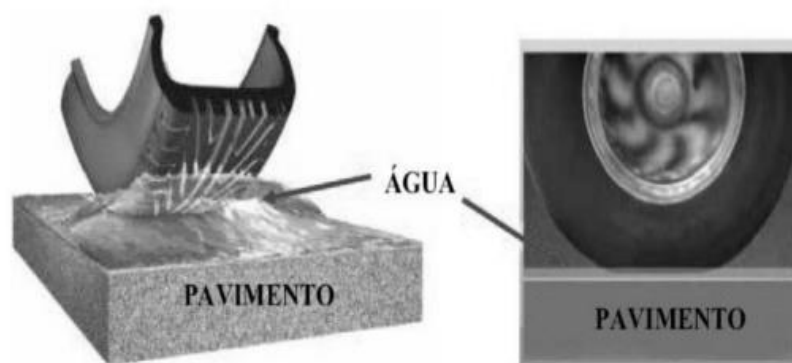


Figura 3 - Representação gráfica da hidroplanagem (Silva, 2008)

Com o aumento da velocidade o tempo de contacto entre o pneu e o pavimento é menor, o que origina uma diminuição do tempo disponível para que a água possa ser expelida. Assim, o atrito em pavimentos molhados diminui com o aumento da velocidade e é proporcional à área da zona onde ocorre efetivamente o contato direto entre o pneu e o pavimento. Mesmo que esse contacto direto ocorra em áreas muito pequenas, o atrito disponível é proporcional ao somatório dessas pequenas áreas (Francisco, 2009).

De acordo com Rodrigues Filho (2006), existem quatro tipos de hidroplanagem:

- Viscosa;
- Dinâmica;
- Com desvulcanização;
- Real/Combinada.

A hidroplanagem viscosa ou viscoplagem acontece em velocidade baixas na presença de películas de águas muito finas, com uma espessura de 0,06 mm. Este fenómeno ocorre

pela incapacidade que o movimento do pneu tem em expelir a água devido a sua viscosidade. A viscoplanagem é mais acentuada em superfícies lisas, portanto, acontece com mais frequência em pavimentos polidos, densos e em áreas onde os detritos ficam alojados nas superfícies do pavimento (Rodrigues Filho, 2006; Silvério, 2015) .

A hidroplanagem dinâmica é um fenómeno que ocorre perante a presença de água na superfície do pavimento. O pneu ao deslocar-se propulsiona a água em várias direções para estabelecer o contacto com o pavimento (Soares, 2011). Na parte da frente da área de contacto é gerada uma onda de pressão correspondente ao impulso transmitido pelo pneu à água. Essa pressão é proporcional ao quadrado da velocidade linear da roda e deforma o pneu de tal modo que, as porções de água posteriores são capazes de penetrar na área de contacto entre o pneu e o pavimento e sustentar parcialmente a carga vertical do pneu. Ou seja, atingindo a altura crítica de água e a velocidade de hidroplanagem, a água invade a área de contacto e deixa de haver o contacto entre o pneu e o pavimento deixando desta forma de ocorrer perdas de energia cinética por adesão e só ocorrendo perdas por histerese no interior da área de contacto(Rodrigues Filho, 2006).

A hidroplanagem com desvulcanização é um fenómeno particular, sendo mais usual ocorrer em aeronaves. Este efeito acontece quando a velocidade de deslocamento de um veículo ultrapassa a velocidade de hidroplanagem e entra em hidroplanagem completa. Devido à falta de rotação e à macrotextura do pavimento, a borracha na área de contacto fica sujeita a repetidas deformações locais, provocando um sobreaquecimento na área de contacto. Caso este processo perdure durante algum tempo, a temperatura na área de contacto pode alcançar um nível em que a borracha perde as suas qualidades elásticas e plastifique (Soares, 2011).

4.4. Influência dos pneus

Existe uma grande variedade de materiais que compõem os pneus de um veículo. De uma forma generalizada é possível dividi-los entre os componentes de borracha e materiais de reforço. O pneu é formado por 7 partes de acordo com o Decreto Lei 72-C de 2003, na Figura 4 é descrito os diversos componente e materiais que compõem um pneu.

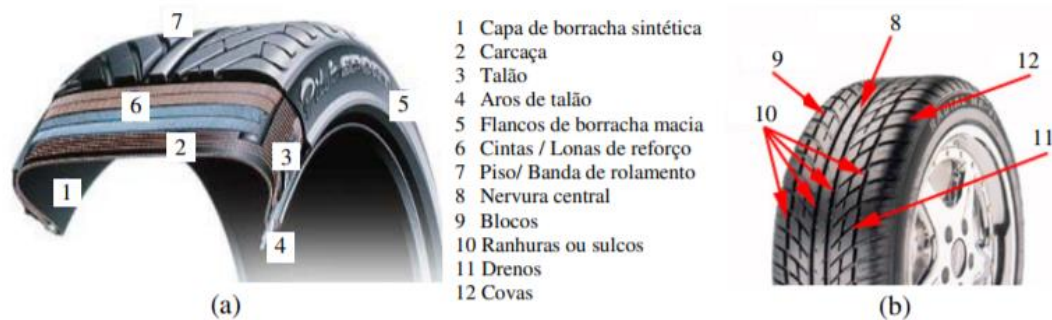


Figura 4 - Constituição de um pneu (a) e do respetivo piso (b)

O grau de dureza da borracha do pneu influencia o desempenho de tração e consequentemente a área de contacto com agregado, como esperado as borrachas mais moles proporcionam maiores valores de atrito, ou seja, existe uma maior envolvimento da borracha com as partículas da camada de desgaste (Wilson, 2006).

No entanto, em velocidades elevadas e na presença de películas de água o pneu com maior dureza proporciona valores mais elevados de atrito. Neste caso, a borracha mais dura resiste à deformação elástica proporcionando um melhor desempenho em comparação com a borracha macia (Wilson, 2006).

Capítulo 5

Características superficiais dos pavimentos

5. CARACTERÍSTICAS SUPERFICIAIS DOS PAVIMENTOS

As características superficiais assumem um papel determinante na circulação de veículos, pois é através destes parâmetros funcionais que é possível criar condições para garantir segurança e comodidade. É muito importante que as características superficiais promovam uma boa adesão do pneu ao pavimento. Esta qualidade é adquirida pela força de atrito gerada entre a interação do pneu com o pavimento. Uma maior rugosidade, não só oferece um coeficiente de atrito maior, como permite uma melhor drenagem da água superficial, promovendo mais contacto entre o pneu e os espaços vazios da superfície do pavimento (Branco et al., 2016).

Na Figura 5 apresenta-se de forma esquemática o comportamento de um pneumático em movimento sobre um pavimento molhado.

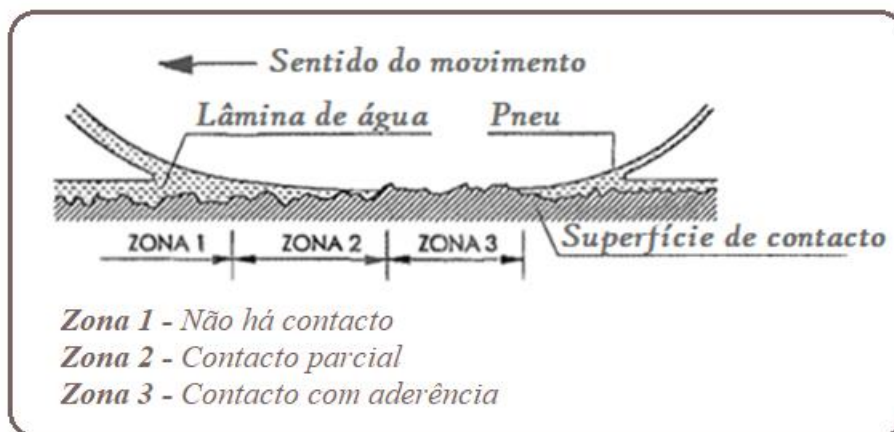


Figura 5 – Representação esquemática do contacto pneu em movimento com o pavimento molhado (Adaptado de Kraemer et al., 2004)

5.1. Textura superficial

A textura superficial de um pavimento é muito importante do ponto de vista funcional e de segurança, pois permite garantir uma maior resistência à derrapagem. As irregularidades e ondulações existentes ao longo do perfil da camada superficial do pavimento são designadas como comprimento de onda da textura, permitindo avaliar quatro tipos de escalas de textura, que correspondem a diferentes gamas de amplitudes, tal como se apresenta-se na Figura 6 (Menezes, 2008; L. Silva, 2009).

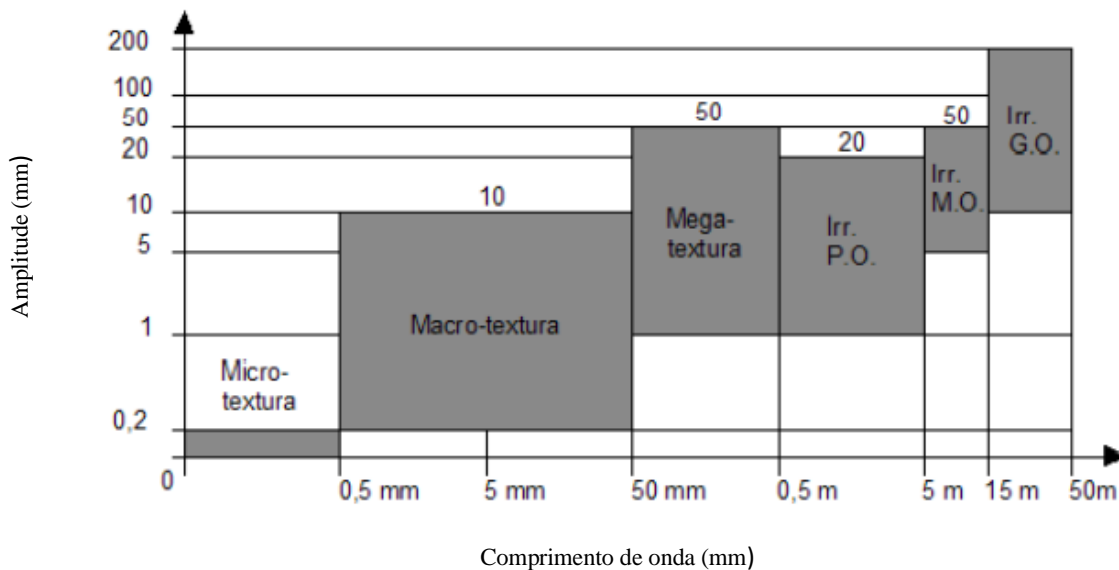


Figura 6 - As irregularidades da superfície de um pavimento (Adaptado de AIPCR / PIARC, 2003)

5.1.1. Microtextura

A microtextura corresponde ao domínio de comprimento de onda compreendido entre 1 μm e 0,5 mm, com uma amplitude entre 1 μm e 0,2 mm, não sendo observável à vista desarmada. Contudo é possível detetar-se através do tato, apresentando superfícies lisas ou ásperas. São os agregados das misturas betuminosas ou hidráulicas, da camada de desgaste que concedem a rugosidade da superfície. As propriedades dos agregados como a sua natureza petrográfica, química e a capacidade de resistir ao polimento são características que têm grande influência na microtextura. Materiais rochosos como o granito e quartzitos, preservam melhor a sua angulosidade e a microtextura, resistindo bem à ação do tráfego (Branco et al., 2016; Menezes, 2008).

5.1.2. Macrotextura

A macrotextura está relacionada com a dimensão dos agregados e aos vazios existentes na mistura. Esta propriedade corresponde ao intervalo de comprimento de onda entre 0,5 mm e 50 mm e uma amplitude vertical entre 0,1 mm e 20 mm. Esta componente da textura tem bastante importância na segurança, pois ela contribui diretamente, simultaneamente com a microtextura, para o atrito gerado na interação pneu-pavimento e para um escoamento mais rápido da água na superfície, reduzindo a possibilidade de derrapagem e hidroplanagem (Menezes, 2008; L. Silva, 2009).

5.1.3. Megatextura

A megatextura corresponde ao intervalo de comprimento de onda entre 50 mm e 500 mm, com uma amplitude vertical entre 0,1 mm e 50 mm. Esta característica da textura difere das demais, pois não é uma propriedade inerente da superfície da camada de desgaste, mas da combinação da macrotextura e das deformações que resultam do desgaste anormal do pavimento. Esta degradação está associada ao aparecimento de deformações localizadas que originam vibrações que são transmitidas ao sistema de direção do veículo e que causam desconforto na condução (Branco et al., 2016).

Estas vibrações são causadoras de ruídos de baixa frequência que provocam a perda de aderência entre os pneus e o pavimento, resultando no aumento da distância de paragem. Ainda no domínio da megatextura encontram-se as deformações com capacidade de armazenamento de água reduzindo o potencial de aderência entre o pneu e a camada de desgaste (Branco et al., 2016; Soares, 2011).

5.1.4. Irregularidade longitudinal e transversal

A irregularidade corresponde a desvios de dimensões superiores à megatextura, isto é, a irregularidades geométricas de comprimento de onda superiores a 0,5 m. Estas deformações de maior dimensão provocam grandes alterações na comodidade e segurança da condução, pois contribuem para um aumento da resistência ao rolamento, amplificando o desgaste do pneu e contribuindo para um aumento das vibrações (L. Silva, 2009).

Esta escala de textura fornece uma boa medida da condição geral do pavimento, por isso é de extrema importância avaliar as irregularidades longitudinais, transversais e o atrito transversal, uma vez que são os parâmetros mais utilizados para a avaliação da qualidade geral e funcional do pavimento (Branco et al., 2016).

É possível definir esta deformação tendo por base dois tipos de análise, segundo a sua geometria e outra segundo os efeitos físicos provocados pela irregularidade. A primeira tem como base a geometria do pavimento e as alterações que este apresenta relativamente a sua geometria ideal. A irregularidade longitudinal é, portanto, um conjunto de desnivelamentos existentes na superfície do pavimento quando comparado com o perfil longitudinal teórico. A segunda análise baseia-se no princípio de que a irregularidade é um conjunto de imperfeições existentes na superfície do pavimento e que têm a capacidade de produzir vibrações nos veículos (Ascenso, 2011; Branco et al., 2016).

O perfil transversal é um bom indicador da qualidade geral de uma estrada. Anomalias no perfil transversal podem afetar a segurança da condução quando a camada de desgaste se encontra molhada, agravando-se com a formação de gelo. Usa-se para avaliar esta característica a medição da profundidade máxima das rodeiras, e é obtido a partir da análise do perfil transversal. Sendo que as rodeiras são um tipo de patologia que ocorre nos pavimentos mesmo perante um bom projeto e uma boa execução construtiva (Branco et al., 2016).

5.2. Atrito

O atrito entre o pneu e a superfície de desgaste é um parâmetro que tem especial interesse para uma circulação em segurança, isto porque está diretamente relacionado com a velocidade de circulação e os acidentes (Branco et al., 2016). É uma característica evolutiva no tempo em função de vários fatores, dos quais se destacam os seguintes [Pereira e Miranda, 1999]:

- Erosão dos agregados, devido passagem de veículos;
- Exsudação da camada de desgaste;
- Aparecimento de descontinuidades devido ao fendilhamento;

- Redução da porosidade do pavimento, devido à degradação da camada de desgaste;
- Existência de rodeiras, que promovem a acumulação de água, ideal para a ocorrência de fenômenos de aquaplanagem e formação de gelo;
- Alteração das propriedades dos materiais da camada de desgaste, devido à poluição originada pelo derrame de combustíveis.

O atrito geral do pavimento é composto pelo coeficiente de atrito longitudinal e o coeficiente de atrito transversal. O coeficiente de atrito longitudinal está diretamente relacionado com a distância de travagem, por sua vez, o coeficiente de atrito transversal tem maior influência na segurança em circulação em curva. Estes valores de coeficiente dependem de fatores como o tipo de pneumáticos, grau de desgaste do pavimento, pressão de enchimento, carga por roda, a presença de água no pavimento, textura superficial, a existência de materiais oriundos dos veículos que se acumulam sobre o pavimento e a velocidade de circulação (Branco et al., 2016; L. Silva, 2009).

5.3. Drenagem

A água é um fator bastante importante em qualquer área da engenharia, pois a sua presença afeta de forma negativa as estruturas, desde a aceleração da degradação de materiais até a alteração de certas propriedades importantes ao seu funcionamento. Nos pavimentos rodoviários a água torna-se um fator ainda mais especial devido ao facto de ser inevitável a sua exposição às condições meteorológicas. É fundamental no dimensionamento de um pavimento, estabelecer critérios que permitam uma boa capacidade de escoamento superficial e ao mesmo tempo criar uma barreira impermeável que impeça a água de alcançar as camadas estruturais, prolongando a sua capacidade estrutural e funcional ao longo da sua vida útil (Kraemer et al., 2004).

A camada de desgaste tem a função de gerar uma barreira impermeável que garanta que a água não atinga as camadas adjacentes, evitando o aparecimento de anomalias graves ao nível estrutural que possam manifestar-se na superfície. No entanto, nos pavimentos drenantes a camada imediatamente anterior à de desgaste fica com a função de impermeabilização do pavimento (Kraemer et al., 2004).

Existem dois fenómenos ligados à presença da água na superfície do pavimento que afetam a circulação. São os fenómenos da hidroplanagem e a perda de visibilidade por projeção de água por outros veículos. A prevenção da hidroplanagem é muito importante em estradas de maior velocidade, pois o excesso de velocidade provoca um agravamento deste fenómeno. Uma boa macrotextura, onde aspetos geométricos como a inclinação do perfil são bem definidos podem minimizar os efeitos adversos da hidroplanagem (Duarte, 2011; Kraemer et al., 2004).

5.4. Ruído

O ruído é um tema cada vez mais estudado e regulamentado, tendo em vista a salvaguarda do bem-estar das populações que vivem nas proximidades de vias rodoviárias. A produção de ruído pelos veículos deriva de três fatores:

- o formato aerodinâmico do veículo;
- a componente mecânica dos veículos;
- a interação entre pneu/pavimento

Na produção de ruído devido à interação do pneu/pavimento, a ação do condutor é muito importante pois a velocidade e a pressão dos pneus, tal como as características dos pneumáticos e da própria superfície do pavimento têm grande influência neste fenómeno. É, portanto, fundamental criar características superficiais, ao nível da macrotextura, que permitam obter propriedades que possibilitem atenuar ou até mesmo absorver o ruído. A “porosidade” da macrotextura é uma das características mais importantes, pois os vazios existentes na superfície do pavimento conseguem absorver parte do ruído gerado pela passagem de veículos (Kraemer et al., 2004).

A percentagem de vazios e a espessura da camada de desgaste são fatores que ajudam para a absorção acústica. A porção de ruído absorvido é menor que a porção de ruído emitido em pavimentos constituídos por misturas betuminosas densas. Por sua vez, em pavimentos com misturas porosas, a absorção está diretamente relacionada com a espessura da camada de desgaste, desta forma quanto maior a espessura, maior a sua capacidade de absorção acústica. Mas nem sempre os pavimentos com misturas porosas adquirem uma boa capacidade de absorção, devido ao facto de ser extremamente difícil

através dos métodos construtivos existentes prever o resultado final da textura. Além da utilização de misturas porosas e drenantes que ajudam na redução do ruído, existem vários estudos no sentido de incorporar partículas de borracha nas misturas betuminosas com o objetivo de diminuir o ruído produzido, em alguns casos resultando numa diminuição de 3 a 5 dB (Duarte, 2011; Kraemer et al., 2004).

5.5. Características superficiais do pavimento e a segurança

A segurança rodoviária ao longo dos anos tem recorrido a estatísticas que chegam do terreno para adaptar as suas soluções às necessidades exigidas pelos seus utilizadores. A inexistência de metodologias capazes de prever e analisar o comportamento funcional de novas misturas previamente, obrigam à sua utilização nas estradas apenas considerando o seu desempenho teórico. A recolha de dados, o desenvolvimento de medidas de prevenção de riscos e o impacto que estes têm na segurança é um trabalho moroso. Por não ser um método pró-ativo, isto é, só é encontrada a solução depois do acidente ocorrer, existe a necessidade crescente para os investigadores de recorrer a novos métodos para garantir atempadamente a segurança nas estradas. Nos últimos anos tem surgido então a necessidade de encontrar modelos computacionais que permitam simular e analisar o comportamento da interação do pneu-pavimento para que através destes seja possível obter parâmetros e indicadores de segurança que possibilitem aumentar o desempenho do pavimento e do pneu, contribuindo assim para uma diminuição de acidentes rodoviários (Young et al., 2014).

Relacionar as características superficiais do pavimento e a segurança não é fácil. Porém, quando analisados os dados que estimam os acidentes de tráfego, é perceptível que os números de acidentes provocados por hidroplanagem aumentam conforme a resistência à derrapagem diminui. Assim é possível estabelecer uma ligação direta entre o risco de acidente numa estrada molhada e as características superficiais. Apesar de ser difícil de quantificar a relação entre acidentes em dias chuvosos e o atrito do pavimento, há vários estudos experimentais e estatísticos que comprovam que o número de acidentes num pavimento molhado aumenta enquanto o atrito diminui (Young et al., 2014).

5.6. Gestão da película de água para estradas mais seguras

Sabey¹ diz que “60% dos acidentes por hidroplanagem ocorre quando a estrada está molhada, mas não está a chover”. Isto pelo facto de após uma chuvada a estrada se encontrar com uma fina película de água impercetível que diminui a capacidade de tração e com a ausência da chuva os condutores adotam uma condução mais agressiva. Os investigadores têm feito algumas pesquisas obtendo conclusões para películas de água mais profundas (> 1 mm), conseguindo obter expressões de cálculo para determinar a velocidade de hidroplanagem² (Do et al., 2013). Existe ainda pouca informação sobre o efeito de películas de água mais finas (< 1 mm) e a perda de atrito entre o pneu e o pavimento. Este efeito é designado como viscoplanagem, onde o termo visco enfatiza o efeito viscoso das películas mais fina de água. Para se conseguir obter mais de 1 mm de profundidade de água é necessária uma chuvada com intensidade de 10 mm/h, porém, este tipo de evento é raro, pelo que os condutores irão experienciar com mais frequência situações com películas de água mais finas. Moore³ explica que apenas a microtextura (superfície menores que 0,2 mm de altura e 0,5 mm em largura) é capaz de mitigar a viscoplanagem, proporcionando pressão suficiente para romper a película de água (Do et al., 2013).

¹ B. Sabey, T. Williams, G. Lupton, Factors affecting the friction of tires on wet roads, SAE Technical Paper 700376, 1970, doi:10.4271/700376.

² Velocidade de hidroplanagem é a velocidade em que o condutor não consegue controlar o veículo para manter a sua trajetória

³ D.F. Moore, The Friction of Pneumatic Tyres, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam (The Netherlands), 1975.

Pesquisas efetuadas por investigadores acima mencionados, conseguiram alcançar um conhecimento valioso sobre a relação entre as características de microtextura da superfície da estrada e o atrito. No entanto, o conhecimento sobre o efeito que a película de água tem sobre a microtextura da superfície é ainda insuficiente (Do et al., 2013).

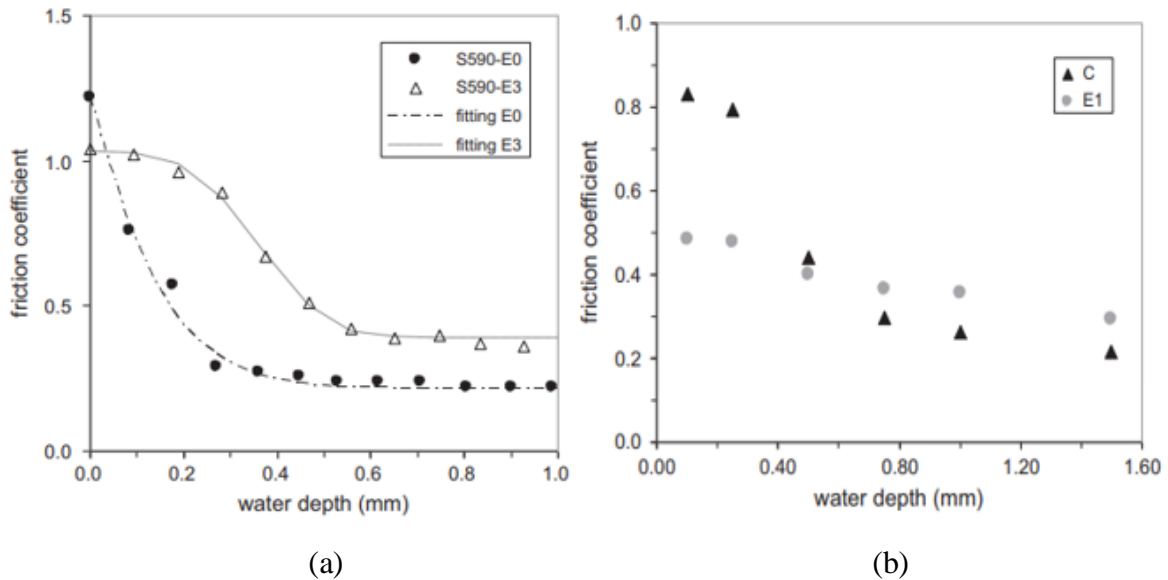


Figura 7 – Variação do coeficiente de atrito (a) com a profundidade da água (b) (Adaptado de Do et al., 2013)

A Figura 7 (a) representa a variação do coeficiente de atrito para diferentes profundidades de água em provetes de ensaio S590-E0 e S590-E3 respetivamente. Estes provetes apresentam níveis de microtextura diferentes, onde o S590-E0 tem uma superfície mais lisa e o S590-E3 uma textura mais rugosa. A Figura 7 (b) representa a variação do coeficiente de atrito com diferentes profundidade de água numa estrada real (Do et al., 2013).

O provete S590-E3 mostra uma variação trifásica onde o coeficiente de atrito mantém seu valor "seco", fase 1, até que uma profundidade de água "crítica" seja alcançada. Quando a altura crítica é atingida o coeficiente de atrito diminui rapidamente com o aumento da profundidade da água, fase 2. Por fim é estabilizado em um valor de atrito final, não variando mais com o aumentar da profundidade da água, fase 3. Para a amostra S590-E0, apenas as fases 2 e 3 são observadas (Do et al., 2013).

Duas observações podem ser feitas a partir da Figura 7, o valor seco do coeficiente de atrito é maior para a amostra S590-E0, em comparação com a amostra S590-E3. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que o atrito seco depende principalmente da área de contacto, que é maior para uma superfície mais lisa (S590-E0). Não há fase 1 para a amostra S590-E0, o baixo nível de microtextura desta superfície, em comparação com o espécime S590-E3, pode explicar o fato de o coeficiente de atrito cair imediatamente assim que a superfície é molhada. O coeficiente de atrito diminui à medida que a profundidade da água aumenta (Do et al., 2013).

A Figura 8, mostra os efeitos da velocidade na curva atrito/profundidade de água. Os resultados são obtidos para os provetes S590-E0 e S590-E3 em diferentes valores de velocidades (20, 40 e 60 km/h). Como pode ser verificado existe uma diminuição do coeficiente de atrito quando as amostras são submetidas à presença de água. No entanto, analisando os dois gráficos é perceptível que para uma altura de água de 0,1 mm existe uma diminuição mais acentuada do coeficiente de atrito na superfície lisa em comparação com a superfície rugosa. Pode ainda ser destacado a influência da velocidade na diminuição do coeficiente de atrito na presença de água (Do et al., 2013).

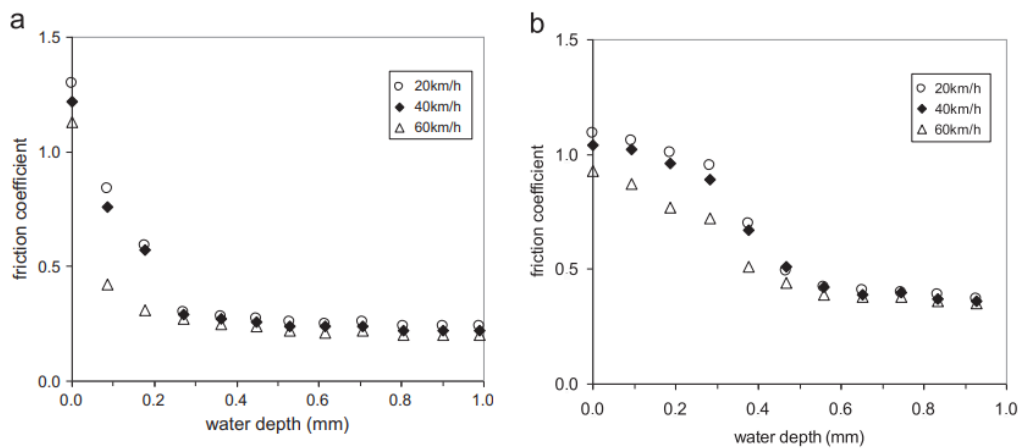


Figura 8 – Efeitos da velocidade na curva atrito/profundidade da água; (a) Espécime S590-E0; (b) Espécime S590-E3 (Adaptado de Do et al., 2013)

Profundidade crítica de água

Os resultados obtidos anteriormente mostram que a superfície permanece com um aspeto normal apesar da presença de uma fina película de água, porém o coeficiente de atrito pode variar significativamente. Este resultado explica o porquê dos condutores nem sempre estarem cientes do real estado do pavimento (Do et al., 2013).

Têm sido efetuados vários estudos nesta área para tentar definir parâmetros que permitam prever situações de viscoplanagem, como é representado na Figura 9, a então chamada profundidade crítica de água será definida como o primeiro passo para a previsão da viscoplanagem (Do et al., 2013).

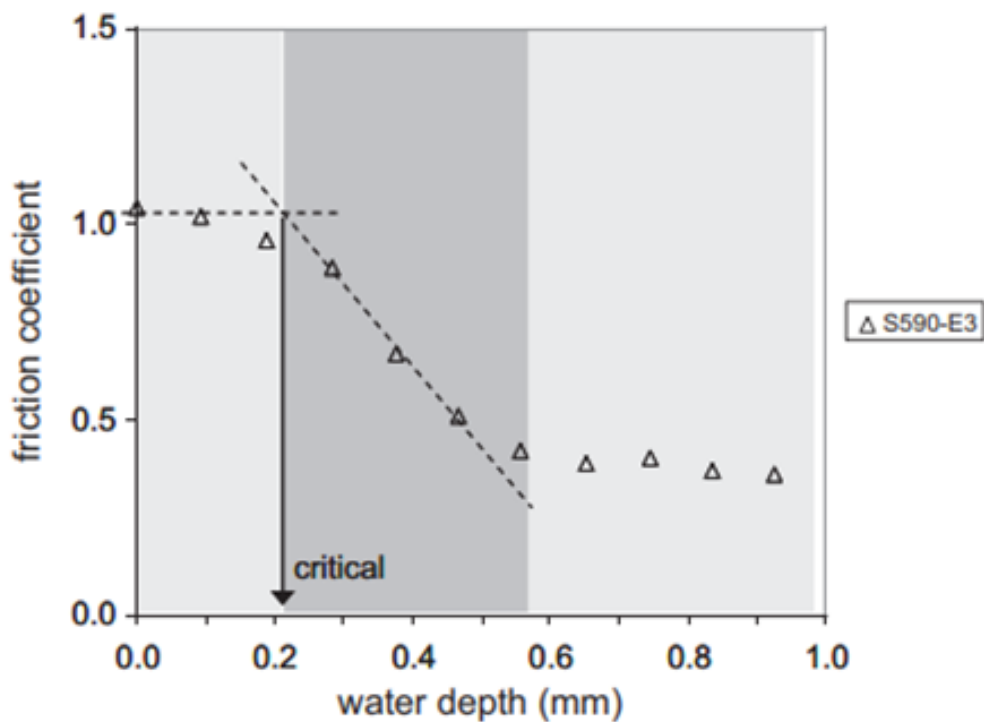


Figura 9 - Definição da altura crítica de água (Adaptado de Do et al., 2013)

Efeitos da microtextura

O gráfico da Figura 10 mostra a importância da microtextura para o aumento da segurança, comparando provetes com diferentes texturas:

- E0 – Liso;
- E1 – Uma passagem de jato de areia;
- E2 – Duas passagens de jato de areia;
- E3 – Três passagens de jato de areia.

Segundo os resultados obtidos o atrito seco é maior para superfícies mais lisas (E0), no entanto, em superfícies com maior microtextura o coeficiente de atrito é maior. Podemos então afirmar que o efeito da microtextura depende da profundidade da água. Como exemplo, valores da profundidade de água crítica para 40 km/h nos provetes E1, E2 e E3 são respectivamente 0,06 mm, 0,12 mm e 0,21 mm. O aumento da microtextura permite então o retardamento da queda do coeficiente de atrito (Do et al., 2013).

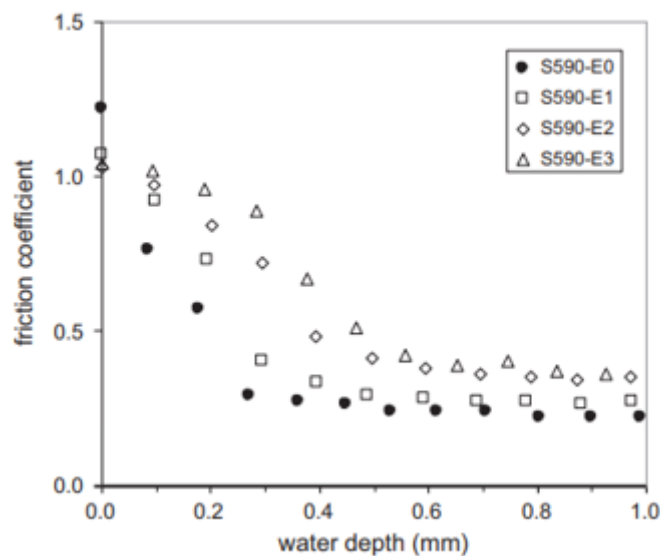


Figura 10 - Efeitos da microtextura na curva atrito/profundidade de água

Capítulo 6

Formulação de Misturas Betuminosas a Quente

6. Formulação de Misturas Betuminosas a Quente

6.1. Considerações Iniciais

De forma a obter-se um bom desempenho funcional dos pavimentos rodoviários é necessário estudar e determinar a melhor combinação de agregados e betume no fabrico de uma mistura betuminosa. Para tal, ao longo dos anos foram-se desenvolvendo determinados tipos de métodos e procedimentos que visam alcançar de forma económica e funcional, misturas que consigam suportar os efeitos das cargas impostas pela ação dos veículos e também garantir características superficiais que permitam maior segurança na circulação. O método de formulação de misturas betuminosas tem como base conseguir determinar uma composição capaz de obedecer a um conjunto de exigências normalizadas em cada método. Porém este tipo de abordagem apenas trata a capacidade estrutural do pavimento e não considera o comportamento mecânico superficial da camada de desgaste, assumindo que as características superficiais são essencialmente determinadas pelas características dos agregados da mistura (Branco et al., 2016).

Estes métodos de formulação de misturas betuminosas podem ser classificados nos seguintes tipos de categorias:

- Definição por especificação
- Empíricos
- Analíticos
- Volumétricos
- Racionais

6.2. Métodos por Especificação

Os métodos por especificação apesar de serem descritos como métodos de formulação na realidade essa designação é incorreta pelo facto de se tratar de uma espécie de receita na qual é descrita os constituintes e procedimentos para a elaboração da mistura. É então pré-estabelecido as características da mistura e o seu procedimento de fabrico. Este método tem vantagem quando se trata de misturas tradicionais e bastante utilizadas, por ser um processo mecanizado leva a uma maior experiência e conhecimento da mistura e

não existe a necessidade de elaboração de ensaios laboratoriais. Por outro lado, é um método que impede a utilização de matérias-primas que apresentem diferentes características das pormenorizadas, que por vezes pode aumentar o custo das misturas e impossibilita a inovação ou a capacidade de adaptabilidade das misturas a novas condições (Branco et al., 2016; Pimentel, 2013).

6.3. Métodos Analíticos

Os métodos analíticos têm como base modelos de previsão matemáticos que através de relações volumétricas para os agregados e ligantes tentam determinar de forma completamente analítica a proporção de cada fração de agregado, volume de ligante e vazios. Durante todo o processo apenas é efetuado um provete de ensaio no fim do estudo que permite determinar se a composição final é ou não aceite (A. Silva, 2014).

Estes métodos não têm por objetivo a obtenção de uma percentagem ótima de betume, antes visam determinar uma composição que assegure a melhor relação entre a resistência ao fendilhamento por fadiga e a resistência à deformação permanente, o que não corresponde necessariamente à formulação de uma mistura betuminosa com um desempenho adequado em obra (Pimentel, 2013).

6.4. Métodos Empíricos

Os métodos empíricos são os mais utilizados na atualidade, e têm como base os métodos por especificação, complementando estes através de ensaios laboratoriais que permitem a determinação da percentagem ótima de betume, de forma a respeitar os limites colocados para diversas variáveis como a estabilidade e a porosidade da mistura. Este tipo de método é desadequado perante novos materiais ou novas exigências, pois apesar da componente experimental, a formulação da mistura é baseada na experiência acumulada ao longo dos anos durante o fabrico não conseguindo desta forma prever as condições em obra. Assim as propriedades intrínsecas não são tidas em conta na formulação da mistura, apenas as suas capacidades mecânicas (Pimentel, 2013).

6.5. Métodos Volumétricos

Os métodos volumétricos, tal como o nome indica, resultam da determinação parcelar dos volumes de agregados, betume e vazios que compõem a mistura. De forma a obter-se a melhor proporção de volumes são efetuados provetes em laboratório que tentam reproduzir tanto quanto possível as condições de compactação aplicadas em obra. Uma vez que o ensaio de compactação utilizado em laboratório produz misturas com propriedades volumétricas semelhantes às obtidas em obra não é necessário elaborar mais ensaios para analisar as propriedades mecânicas. Porém, devido ao elevado número de variáveis envolvidas existe a necessidade de complementar o estudo das propriedades mecânicas das misturas com outros ensaios (Pimentel, 2013).

6.6. Métodos Racionais

Os métodos racionais são caracterizados pela utilização de provetes obtidos através de relações volumétricos, métodos volumétricos, que são submetidos a ensaios de caracterização com a finalidade de estudar o comportamento em serviço das misturas. As principais características analisadas são o módulo de deformabilidade, a controlo de fendilhamento e o controlo da deformação à fadiga.

Este tipo de método tem como vantagem permitir uma maior versatilidade de misturas, uma vez que através dos ensaios realizados pode-se controlar o comportamento de diferentes tipos de materiais em diferentes condições. No entanto estes ensaios são muito dispendiosos e requerem muito tempo para a sua elaboração, assim estes métodos são apenas utilizados em obras de maior importância (Branco et al., 2016; A. Silva, 2014).

Capítulo 7

Modelação da macrotextura baseada nas características
composicionais das misturas

7. Modelação da macrotextura baseada nas características composicionais das misturas

7.1. Introdução

O presente caso prático começou por estudar e avaliar as propriedades intrínsecas de três tipologias de misturas betuminosas, no sentido de correlacionar os seus parâmetros composicionais e as suas características texturais. Considerou-se, portanto, de extrema importância conseguir integrar os parâmetros das misturas e os seus índices físicos no estabelecimento da metodologia. No sentido de, através da análise e estudo do seu comportamento, ser possível otimizar as misturas para serem mais eficazes do ponto de vista da segurança.

7.2. Misturas estudadas

Tal como referido no ponto anterior escolheu-se três tipologias de misturas betuminosas para que o estudo tivesse a capacidade de abranger um maior número de variáveis e desta forma tornar o modelo mais próximo da realidade. Para tal foram escolhidas duas misturas densas e uma mistura aberta, correntemente utilizadas na rede rodoviária nacional:

- Betão betuminoso (BB)
- Micro-betão rugoso (mBBR)
- Betão betuminoso drenante (BBD)

O betão betuminoso é uma mistura usada para a camada de desgaste, mas por ser uma mistura fechada e resistente é também usada como camada de regularização antes de camadas drenantes. Este tipo de mistura quando aplicada como camada de desgaste não deve exceder os 5 cm de espessura e os seus agregados têm uma dimensão máxima de 10 a 14 mm (Branco et al., 2016).

O Micro-betão betuminoso rugoso é uma mistura betuminosa a quente e é utilizada em camadas de desgaste com espessura bastante reduzida, entre 2,5 a 3,5 cm. Por ser uma

camada de tal forma delgada pode ser designada como tratamento superficial, já que não contribui para a resistência do pavimento (Branco et al., 2016) .

O betão betuminoso drenante é uma mistura aberta, com uma porosidade muito elevada de 22 a 30%, como uma granulometria descontínua em que o agregado tem uma dimensão máxima de 14 mm. É usado como camada de desgaste com 4 cm de espessura, por causa da sua elevada porosidade, a água que atinge o pavimento escoar-se pelo interior da camada em vez de escoar pela superfície como é habitual (Branco et al., 2016).

7.3. Características das misturas

7.3.1. Granulometria

Parte fundamental na fabricação de uma mistura betuminosa passa pela combinação de agregados com diferentes granulometrias. Como mencionado em capítulos anteriores, as misturas betuminosas estão sujeitas a fusos granulométricos que devem ser respeitados. Para obter o fuso granulométrico pretendido, é necessário recorrer a métodos gráficos, analíticos automáticos ou através de um método analítico por tentativas. A combinação ideal é aquela em que as percentagens obtidas se encontram numa linha bem desenvolvida entre o limite superior e inferior do fuso a respeitar, pelo que é imperativo que nenhuma percentagem saia desses limites granulométricos.

No Quadro 3 são apresentados os fusos granulométricos dos três tipos de misturas estudadas.

Quadro 3 – Fuso granulométrico a respeitar para camada de desgaste em cada mistura

Abertura das malhas dos peneiros ASTM	Fuso Granulométrico		
	BB	mBBR	BBD
19,0 mm (3/4")	-	-	100
16,0 mm (5/8")	100	-	-
12,5 mm (1/2")	80-88	100	80-100
9,5 mm (3/8")	66-76	80-100	50-80
4,75 mm (nº4)	43-55	30-42	15-30
2,00 mm (nº10)	25-40	22-32	10-22
0,85 mm (nº20)	-	15-26	6-13
0,425 mm (nº40)	10-18	12-24	-
0,180 mm (nº80)	7-13	9-18	-
0,075 mm (nº200)	5-9	7-12	3-6

Neste trabalho utilizou-se o seguinte conjunto de agregados que serviu de base para a formulação dos três tipos de misturas betuminosas:

- Gravelha 3 – Agregado britado dimensão max. 14 mm
- Gravelha 2 – Agregado britado dimensão max. 12 mm
- Gravelha 1 - Agregado britado dimensão max. 10 mm
- Pó de granito - Agregado britado dimensão max. 5 mm
- Filler – filler comercial dimensão max. 0,18 mm

No Quadro 4 apresentam-se as granulometrias dos agregados acima apresentados com a indicação da percentagem de agregado passado em cada peneiro.

Quadro 4 - Granulometria dos agregados a utilizar

Peneiro ASTM	1''	5/8''	1/2''	3/8''	nº4	nº10	nº40	nº80	nº200
Abertura das malhas (mm)	25	16	12,5	9,375	4,75	2	0,425	0,18	0,075
Gravelha 3	100 %	100 %	42,9 %	4,5 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,0 %	0,0 %
Gravelha 2	100 %	100 %	95,6 %	50,3 %	1,4 %	1,0 %	0,9 %	0,8 %	0,6 %
Gravelha 1	100 %	100 %	100 %	99,2 %	6,3 %	1,3 %	1,0 %	0,8 %	0,6 %
Pó de granito	100 %	100 %	100 %	100 %	94,1 %	59,2 %	25,8 %	15,8 %	7,8 %
Filler	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	97,2 %	64,6 %

Neste estudo foi utilizado o método analítico por tentativas, optou-se por este procedimento uma vez que é mais simples controlar a curva granulométrica em estudo. Nos gráficos seguintes (Figuras 11 a 13) serão apresentadas as curvas gramométricas obtidas para cada mistura betuminosa.

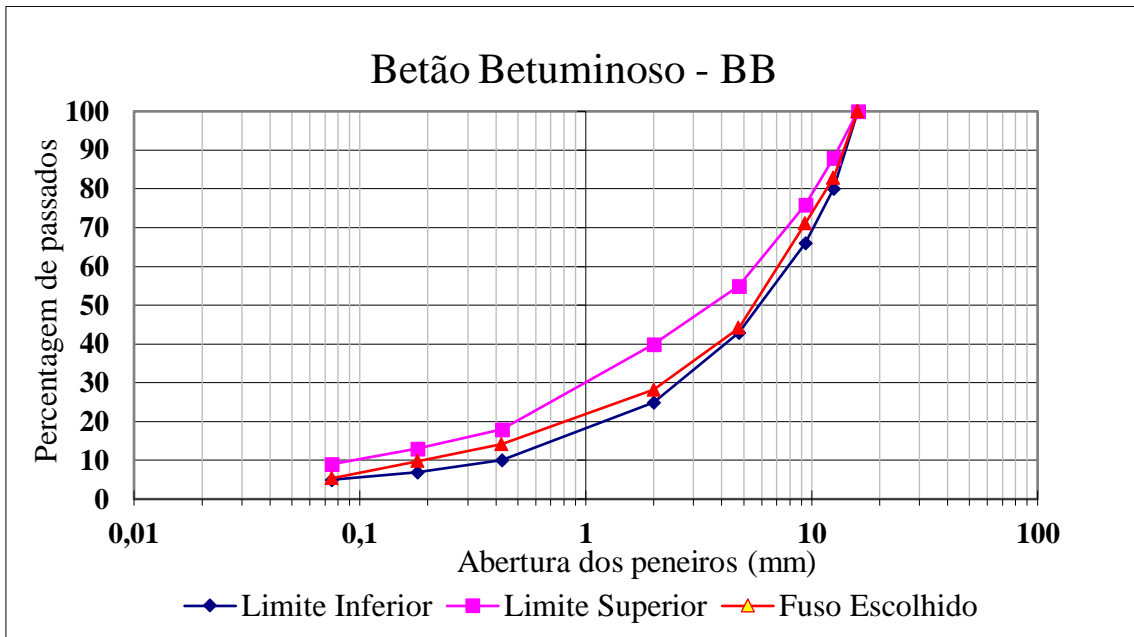


Figura 11 – Curva granulométrica escolhida para o Betão Betuminoso

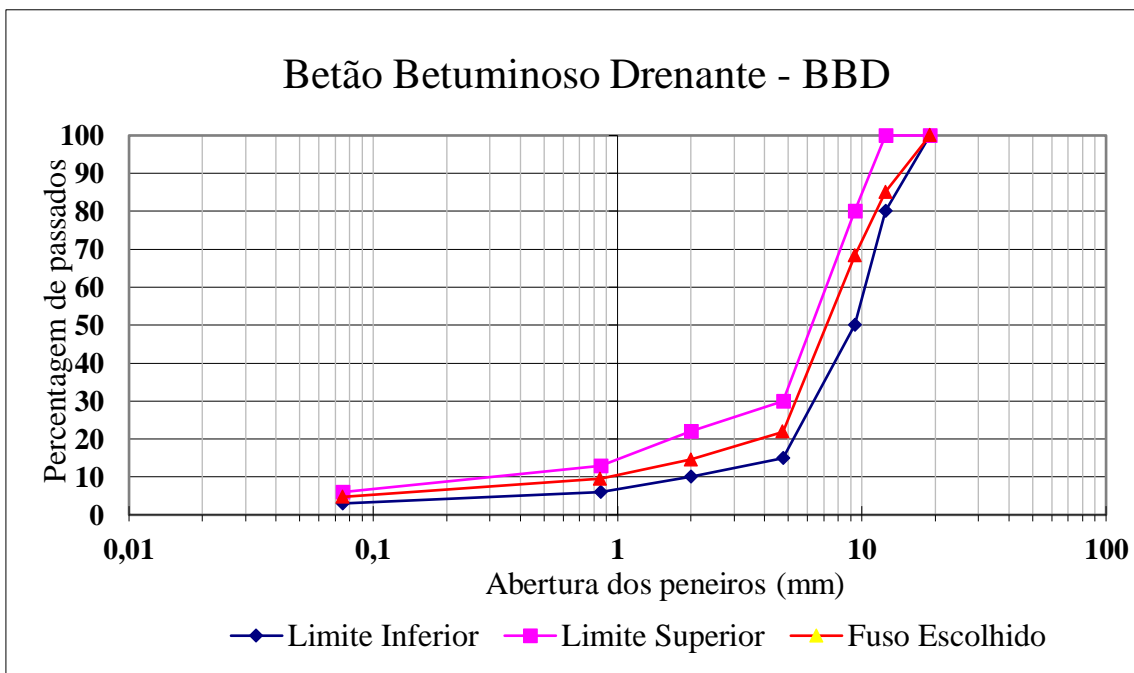


Figura 12 – Curva granulométrica escolhida para o Betão Betuminoso Drenante

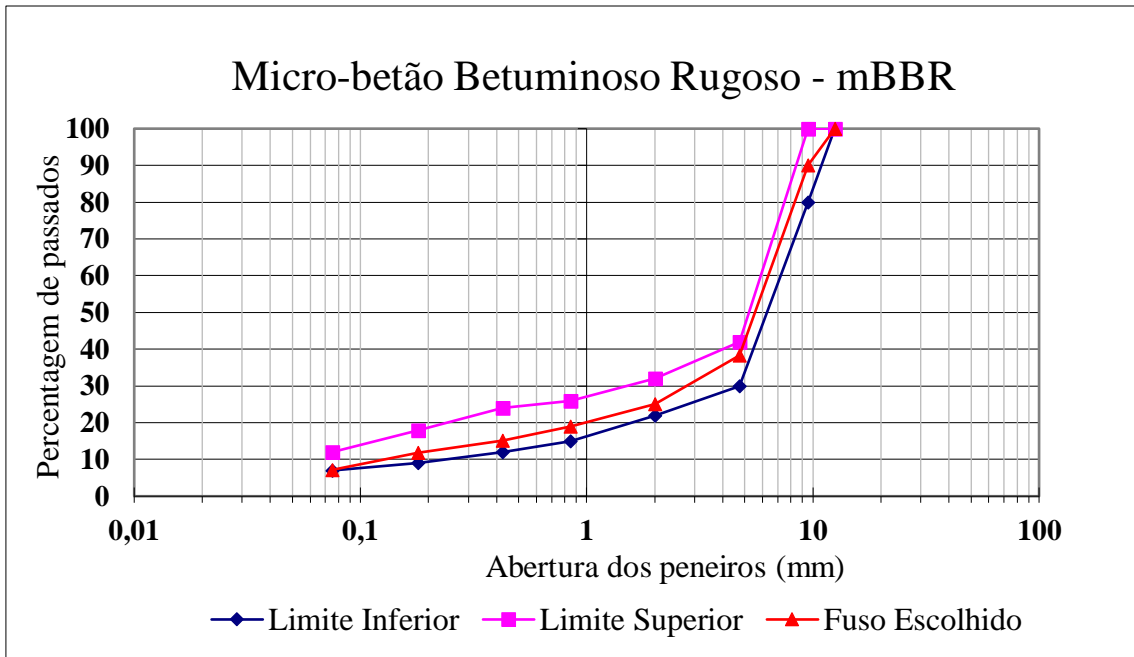


Figura 13 – Curva granulométrica escolhida para o Micro-betão Betuminoso Rugoso

As combinações de agregados sem ligante, em termos de percentagens ponderais de cada componente, vulgarmente conhecidas como misturas secas, referentes a cada uma das misturas tipo é apresentada no Quadro 5.

Quadro 5 - Combinações percentuais utilizadas para cada tipo de mistura

Agregados	BB	mBBR	BBD
Gravilha 3	30 %	0 %	25 %
Gravilha 2	0 %	0 %	15 %
Gravilha 1	25 %	64 %	40 %
Pó de granito	42 %	29 %	15 %
Filler	3 %	7 %	5%

7.3.2. Índices Físicos

Para o estudo das misturas foi necessário calcular os índices físicos das mesmas. Através da relação destas grandezas elementares é possível determinar os diversos parâmetros que caracterizam a mistura betuminosa (Branco et al., 2016). Na Figura 14 representam-se os diferentes componentes que constituem a mistura betuminosa nas suas proporções volumétricas e ponderais.

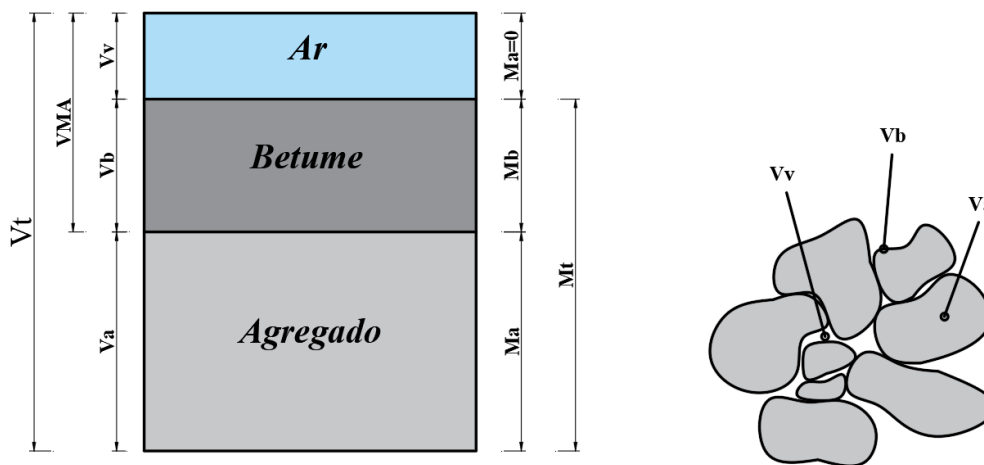


Figura 14 - Composição de uma mistura

i. Massa Volúmica -

$$\rho_s = \frac{M_a}{V_a} \quad (6.1)$$

$$\rho_b = \frac{M_b}{V_b} \quad (6.2)$$

$$\rho_t = \frac{M_t}{V_t} \quad (6.3)$$

Onde,

M_a Massa de material agregado

M_b Massa de betume

M_t Massa total

V_a Volume de agregado

V_b Volume de betume

V_t Volume total

ρ_b Massa volúmica do betume componente numa mistura betuminosa

ρ_s Massa volúmica das partículas componente numa mistura betuminosa

ρ_t Massa volúmica numa mistura betuminosa

ii. Percentagens em Massa e em Volume -

$$p_b = 100 \times \frac{M_b}{M_t} \quad (6.4)$$

$$p_a = 100 \times \frac{M_a}{M_t} \quad (6.5)$$

$$V_b = 100 \times \frac{V_b}{V_t} \quad (6.6)$$

$$V_a = 100 \times \frac{V_a}{V_t} \quad (6.7)$$

$$n = 100 \times \frac{V_v}{V_t} \quad (6.8)$$

Onde,

M_a	Massa de material agregado
M_b	Massa de betume
M_t	Massa total
V_a	Volume de agregado
V_b	Volume de betume
V_t	Volume total
p_a	Percentagem de agregado (em relação à massa total) numa mistura betuminosa
p_b	Percentagem de betume (em relação à massa total) numa mistura betuminosa
n	Porosidade

iii. Teor de Betume -

$$t_b = 100 \times \frac{M_b}{M_a} \quad (6.9)$$

Onde,

M_a Massa de material agregado

M_b Massa de betume

t_b Teor em betume (cociente entre a massa de betume com a massa de agregado seco)

iv. Massa Volúmica “Máxima” da Mistura -

$$\rho_{máx} = \frac{1}{\frac{p_b}{100 \times \rho_b} + \frac{p_a}{100 \times \rho_s}} \quad (6.10)$$

Onde,

p_a Percentagem de agregado (em relação à massa total) duma mistura betuminosa

p_b Percentagem de betume (em relação à massa total) duma mistura betuminosa

ρ_b Massa volúmica do betume componente duma mistura betuminosa

ρ_s Massa volúmica das partículas componente duma mistura betuminosa

$\rho_{máx}$ Massa volúmica “máxima” (ou teórica) duma mistura betuminosa

Os parâmetros de referência considerados para os três diferentes tipos de mistura modeladas são apresentados no Quadro 6:

Quadro 6 – Dados iniciais utilizados para cada tipo de mistura

	BB	BBD	mBBR
Porosidade	5.00 %	30.00 %	6.00 %
Teor de betume	5.20 %	5.20 %	5.20 %
Peso volúmico agregado	26.00 kN/m ³	26.00 kN/m ³	26.00 kN/m ³
Peso volúmico betume	10.20 kN/m ³	10.20 kN/m ³	10.20 kN/m ³

Partindo dos parâmetros das misturas definidos, e com recurso às expressões matemáticas acima referidas, calcularam-se as propriedades finais teóricas de cada mistura referidas no Quadro 7.

Quadro 7 – Propriedades das misturas em estudo

Propriedades da mistura	BB	mBBR	BBD
Volume de betume (%)	0.1112	0.1100	0.0819
Volume de agregado (%)	0.8388	0.8300	0.6181
Porosidade (%)	0.05	0.06	0.3
Peso de betume (kN/m ³)	1.13	1.12	0.84
Peso do agregado (kN/m ³)	21.81	21.58	16.07
Peso total (kN/m ³)	22.94	22.70	16.91
VMA (%)	0.161	0.17	0.38
Volume de agregado e betume (%)	0.950	0.940	0.700
Volume total (%)	1.00	1.00	1.00
BMT (kN/m ³)	24.06	24.06	24.06
Peso volúmico da mistura (kN/m ³)	22.86	22.62	16.84
Peso volúmico da mistura (sem betume) (kN/m ³)	21.72	21.50	16.01

Na figura 15 é apresentada uma representação volumétrica das composições das misturas, onde é possível observar de forma esquemática a proporção que representa o volume de cada uma das fases que compõem as misturas.

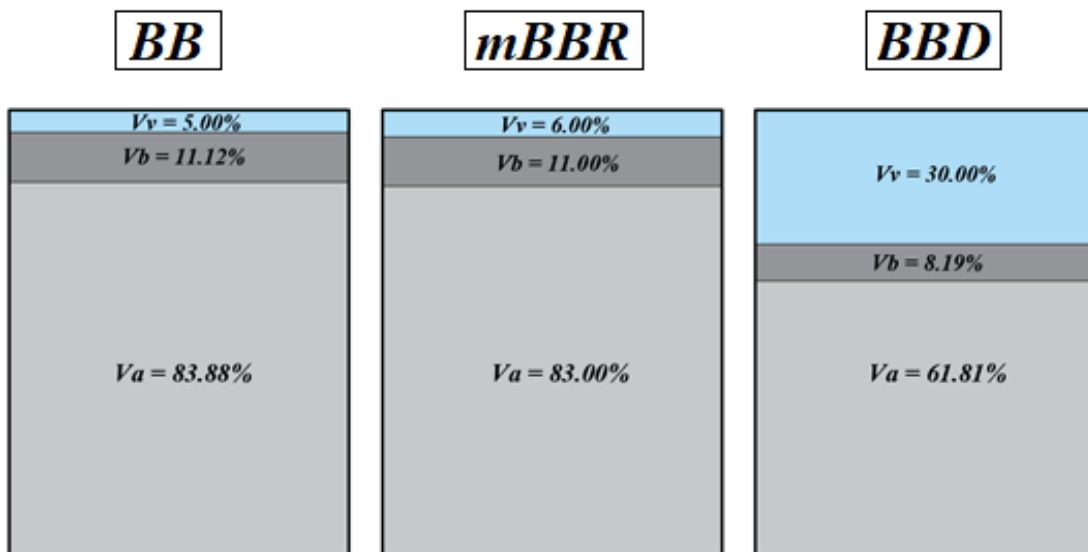


Figura 15 - Representação volumétrica das composições das misturas em estudo

7.4. Modelação da mistura

Neste capítulo pretendeu-se desenvolver uma metodologia que permita criar um modelo computacional de misturas betuminosas com a finalidade de estudar o seu comportamento e otimizar as características funcionais das misturas com base nos seus parâmetros. Para tal, iniciou-se este projeto estabelecendo o formato mais adequado para representar as partículas de agregado.

As formas dos grãos que compõem as misturas são de configuração irregular, de modo a criar um imbricamento entre si, para que seja possível gerar um esqueleto dentro da mistura que consiga distribuir uniformemente as cargas em profundidade.

Optou-se por representar o agregado de forma esférica, devido ao facto de ser mais simples de modelar e criar modelos simplificados numa primeira estância.

Após a determinação do fuso granulométrico de cada mistura foi necessário proceder ao cálculo dos diâmetros esféricos equivalentes. Estes diâmetros correspondem aos diâmetros médios das partículas de agregado que passam numa determinada dimensão. Os diâmetros esféricos equivalentes foram determinados em intervalos de 10% de material passado. D_n representa a dimensão (diâmetro esférico equivalente) do peneiro onde passa $n\%$ do material.

Na Figura 16, 17 e 18 apresenta-se de forma esquemática o processo de obtenção dos diâmetros esféricos equivalentes.

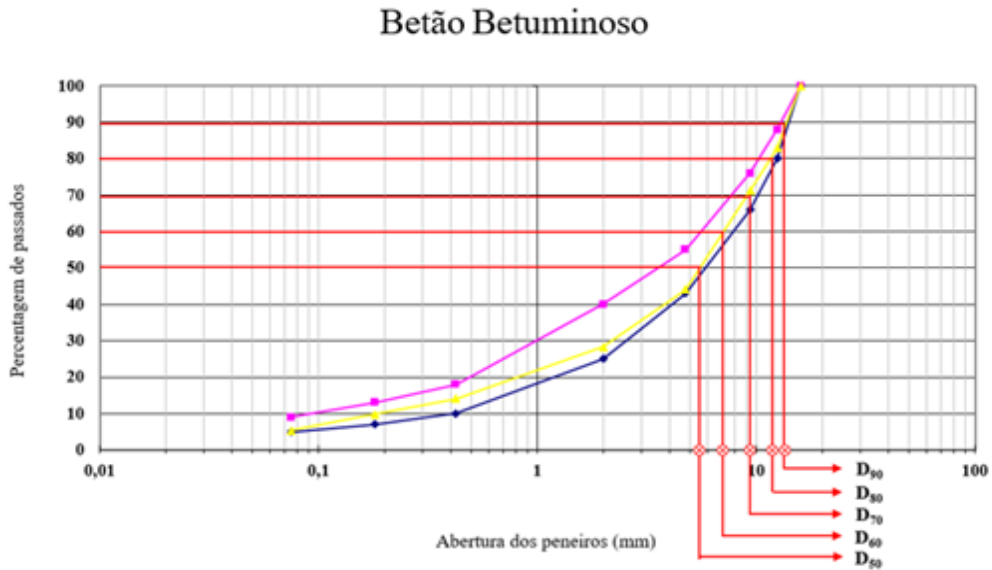


Figura 16 – Determinação dos diâmetros esféricos equivalentes na curva de granulometrias da mistura BB

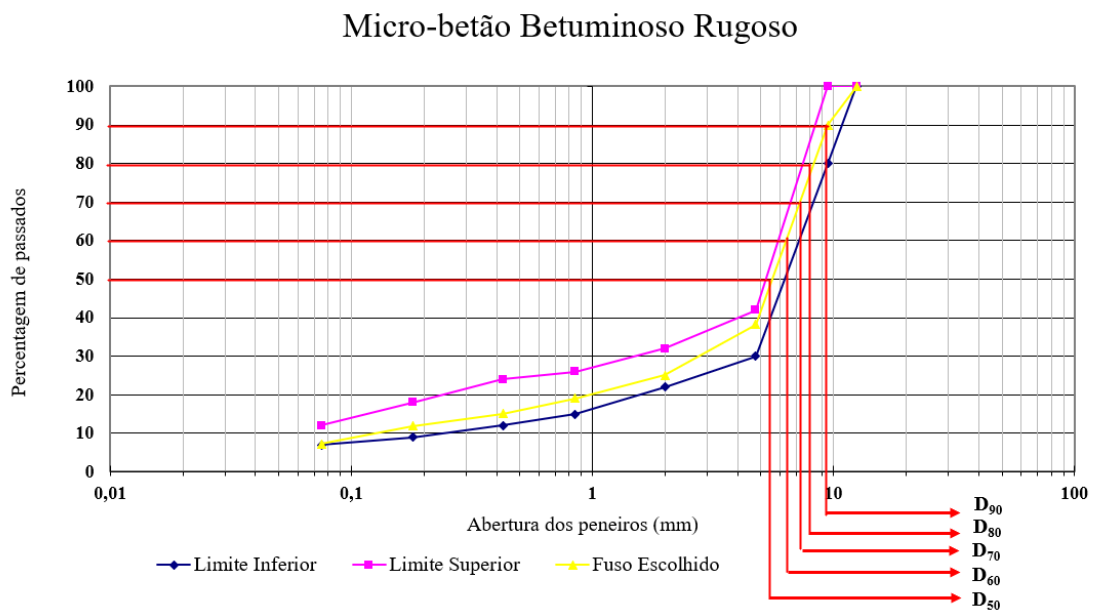


Figura 17 – Determinação dos diâmetros esféricos equivalentes na curva de granulometrias da mistura mBBR

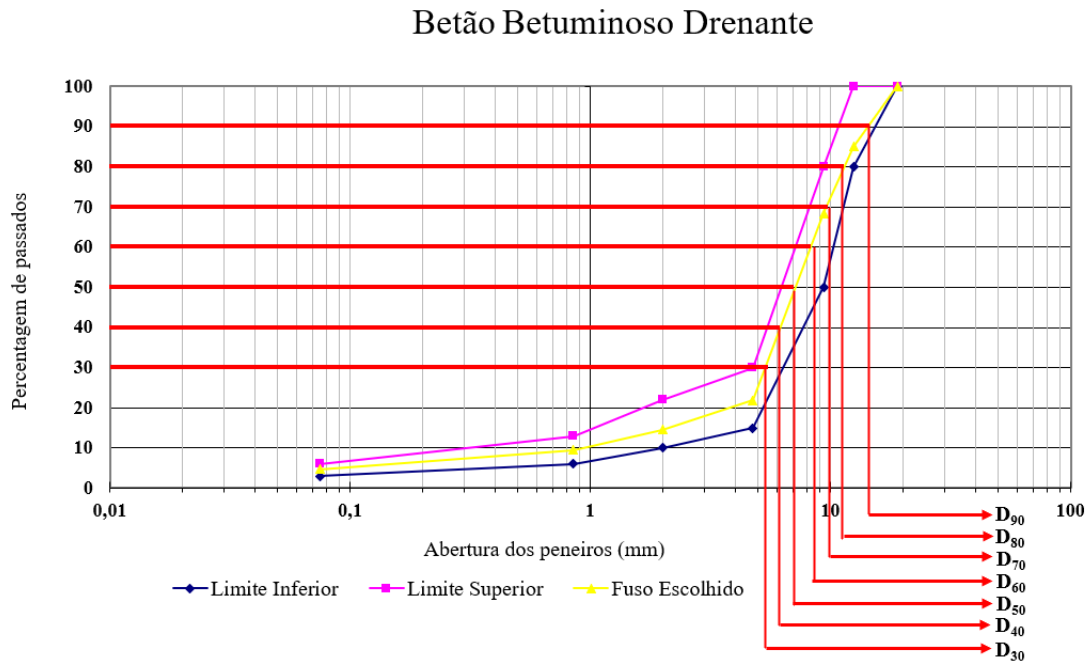


Figura 18 – Determinação dos diâmetros esféricos equivalentes na curva de granulometrias da mistura BBD

Apenas foi considerado o agregado de diâmetro esférico superior a 5,00 mm, pois as partículas abaixo desse diâmetro são de dimensões muito semelhantes entre as diferentes tipologias de misturas. Assim para não sobrecarregar o modelo definiu-se que a baixo de 5,00 mm são partículas de tamanhos reduzidos pelo que têm menor influência nas características superficiais da mistura, sendo por isso consideradas como parte da argamassa betuminosa que tem como função fechar a mistura e ligar as partículas de maior dimensão. Nos Quadros 8, 9 e 10 apresentam-se os diâmetros esféricos equivalentes obtidos para cada tipologia de mistura.

Quadro 8 – Diâmetros esféricos equivalentes para o Betão Betuminoso

Passados	D _i	D _i
%	%	mm
100,0	-	-
82,9	90	13,96
71,2	80	11,77
44,1	70	9,30
28,2	60	7,54
14,1	50	5,78

Quadro 9 – Diâmetros esféricos equivalentes para o Betão Betuminoso Drenante

Passados	D_i	D_i
%	%	mm
100,0	-	14,65
85,1	90	11,59
68,4	80	9,80
21,9	70	8,65
14,6	60	7,62
9,5	50	6,60
6,4	40	5,58
4,7	30	4,56

Quadro 10 – Diâmetros esféricos equivalentes para o Micro-Betão Betuminoso Rugoso

Passados	D_i	D_i
%	%	mm
100,0	-	-
100,0	90	9,50
90,0	80	8,58
38,3	70	7,66
25,0	60	6,75
19,0	50	5,83

Uma vez determinados os diâmetros esféricos equivalentes e com base nas propriedades das misturas acima demonstradas, procedeu-se ao cálculo do número de partículas existentes dentro de um provete de 50 mm de raio e com uma altura máxima igual a altura determinada pelo diâmetro esférico equivalente d90. Foi adotado este procedimento para gerar o volume de pavimento que diretamente influencia a superfície do pavimento. Uma vez que D90 é a dimensão máxima das esferas no modelo, considerou-se uma altura de camada D90 que, no mínimo consiga reproduzir as condições encontradas na primeira faixa de partículas de agregados que se encontram na superfície e que promovem o contacto entre o pneu e o pavimento, evitando tornar o modelo de difícil cálculo.

Nos Quadros 11, 12 e 13 são apresentados o número de esferas obtidas para cada tipo de provete em estudo.

Quadro 11 - Número de esferas para um provete de 50 mm de raio para uma mistura de Betão Betuminoso

D_i		nº de esferas
	mm	un
d₉₀	13,96	6
d₈₀	11,77	10
d₇₀	9,30	21
d₆₀	7,54	39
d₅₀	5,78	86

Quadro 12- Número de esferas para um provete de 50 mm de raio para uma mistura de Betão Betuminoso Drenante

D_i		nº de esferas
	mm	un
d₉₀	14,65	3
d₈₀	11,69	6
d₇₀	9,80	10
d₆₀	8,65	15
d₅₀	7,62	21
d₄₀	6,60	33
d₃₀	5,58	55

Quadro 13- Número de esferas para um provete de 50 mm de raio para uma mistura de Microbetão Betuminoso Rugoso

D_i		nº de esferas
	mm	un
d₉₀	9,50	13
d₈₀	8,58	18
d₇₀	7,66	25
d₆₀	6,75	36
d₅₀	5,83	56

Com o número de esferas que representa o agregado no provete determinadas, foi criado um modelo primário da macrot textura. Este processo foi efetuado no programa Solidworks, onde se procedeu a colocação das partículas dentro do provete. Este método começou pela modelação de uma caixa com 50 mm de raio que serve de suporte para a colocação e distribuição dos agregados.

Os agregados foram colocados de forma aleatória apenas seguindo o princípio de serem ordenados e alinhados na face inferior da caixa para simular a compactação gerada no fabrico dos pavimentos. Nesta fase é de realçar a importância de obter um algoritmo que permita gerar as coordenadas de cada partícula para que possam ser atribuídas posteriormente no programa, e conseguir obter um padrão aleatório. Na Figura 19 é apresentado um conjunto de imagem que mostram o seguimento deste procedimento.

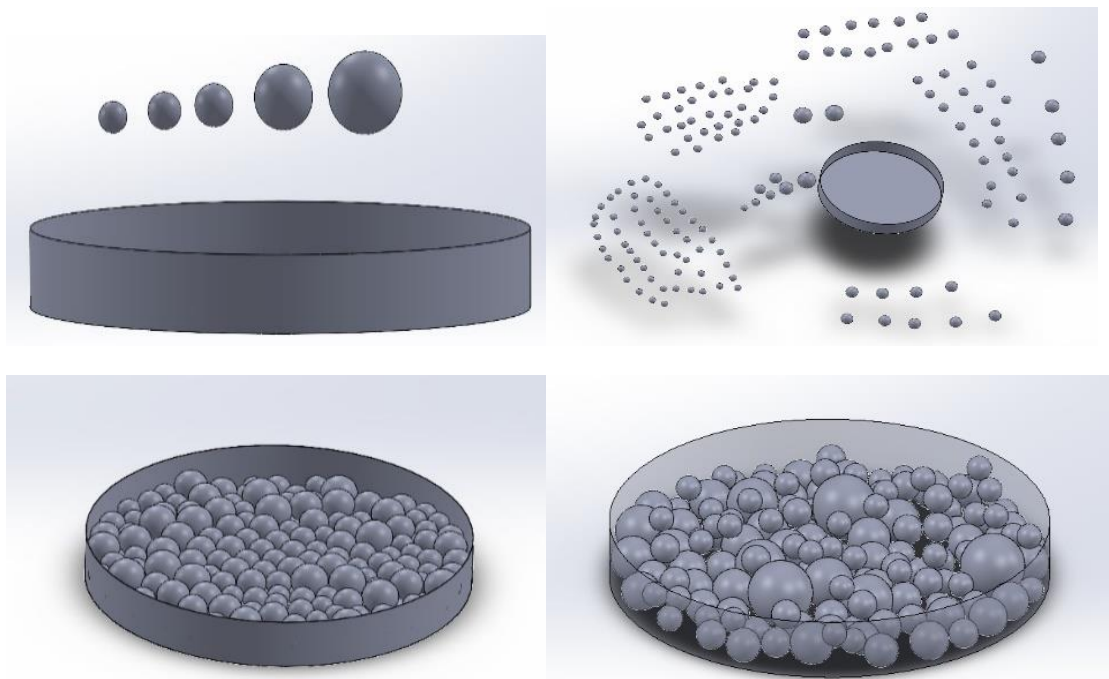


Figura 19 – Procedimento para a obtenção do provete no Programa Solidworks

Nas Figuras 20, 21 e 22 apresentam-se os provetes modelados para as diferentes tipologias de misturas.

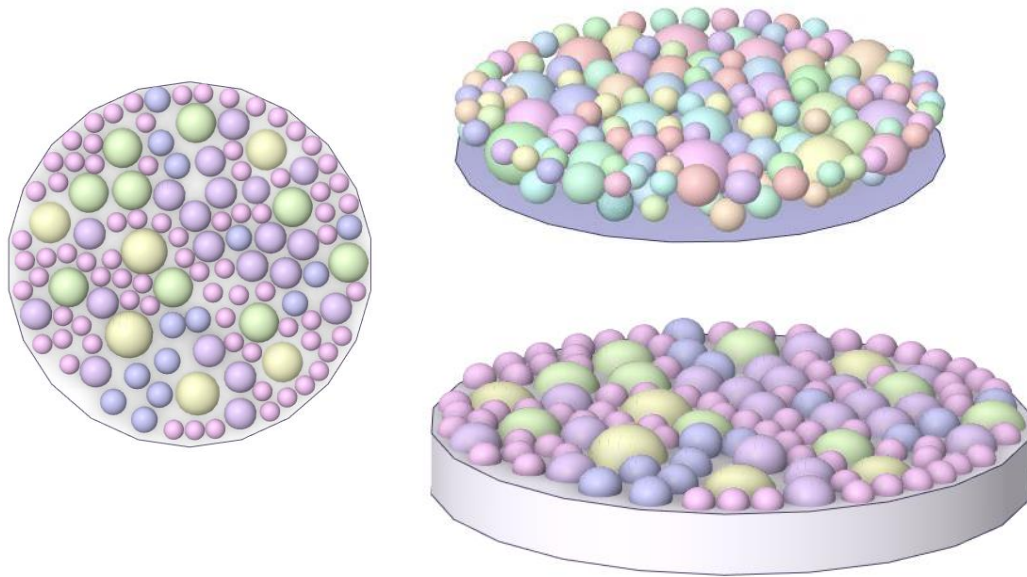


Figura 20 – Representação gráfica do provete da mistura betão betuminoso

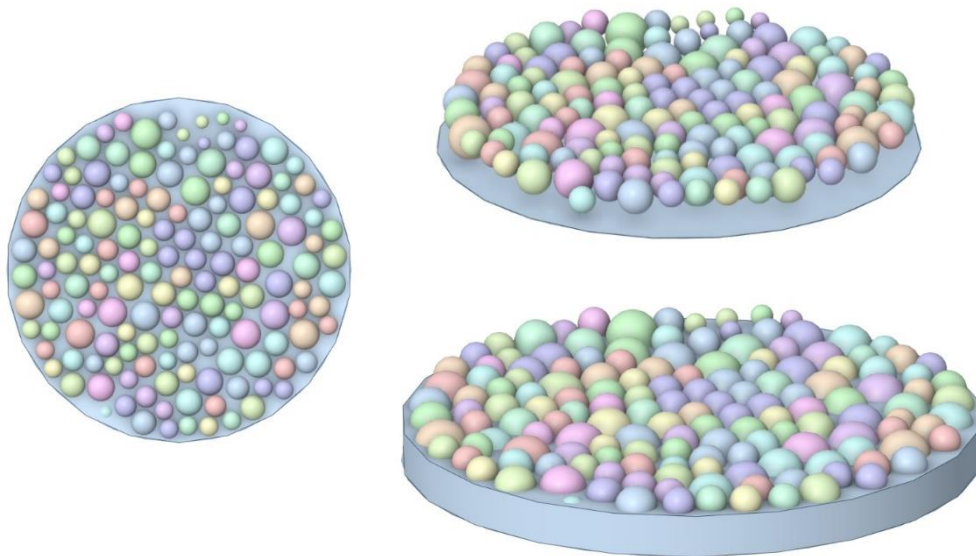


Figura 21 – Representação gráfica do provete da mistura micro-betão rugoso

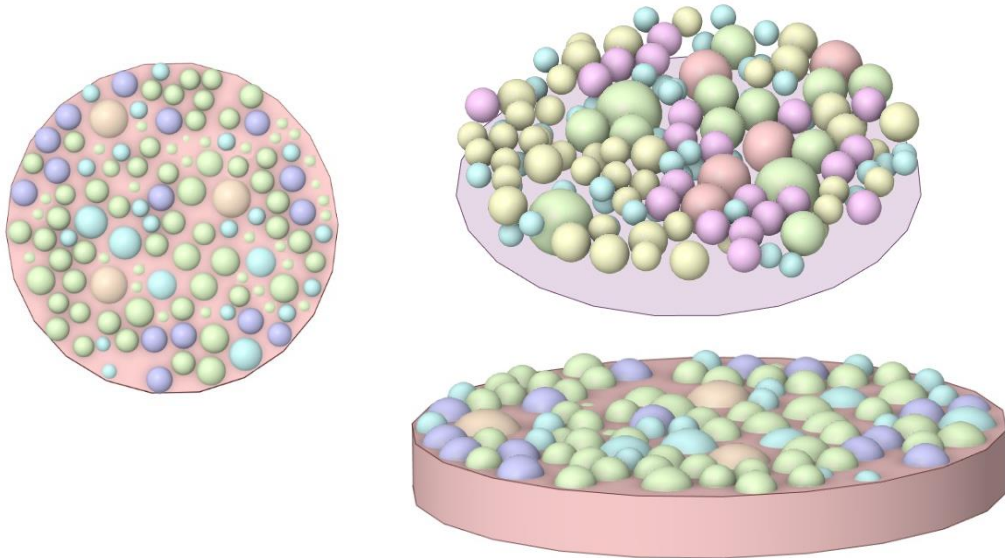


Figura 22 – Representação gráfica do provete da mistura betão betuminoso drenante

Na Figura 23 são representadas texturas de pavimentos reais que permitem uma comparação para os diferentes tipos de misturas em estudo.

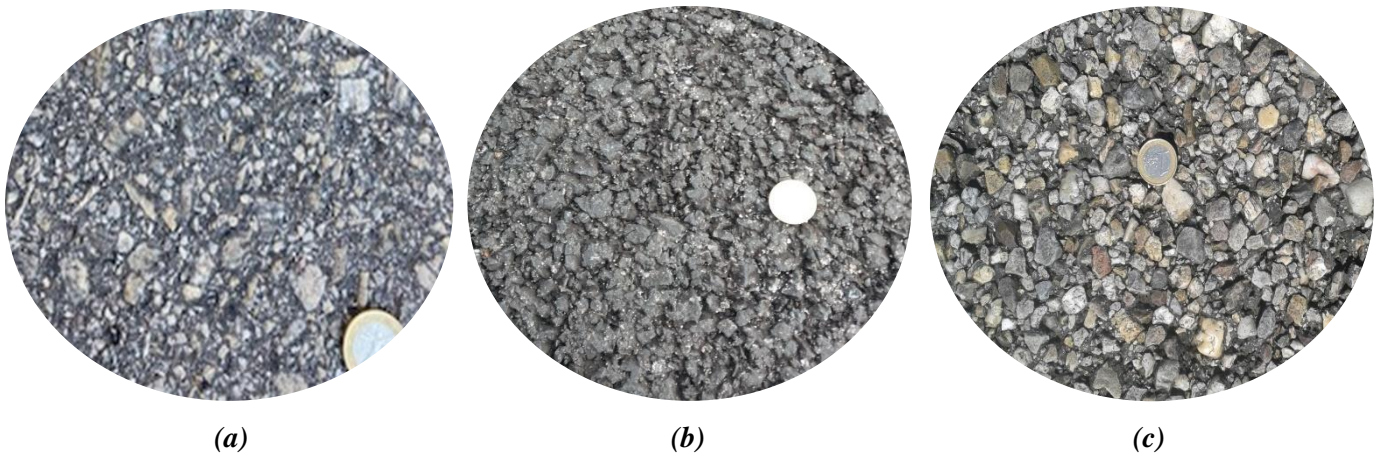


Figura 23 - Texturas de pavimentos reais dos diferentes tipos de misturas (mistura BB (a), mistura mBBR (b) e mistura BD (c))

7.5. Área de contacto pneu-pavimento

7.5.1. Considerações Gerais

O pneu tem com função garantir o contacto entre o veículo e o pavimento a fim de distribuir as cargas impostas, dando origem a uma área de contacto que depende da pressão de enchimento do mesmo. É através do atrito gerado entre estas duas superfícies que é possível garantir e regular o movimento do veículo.

7.5.2. Modelação da área de contacto

Tal como referido nos pontos anteriores, a área de contacto depende, da pressão e da rigidez da borracha que constitui o piso do pneu. Portanto, de forma a simplificar o modelo, foram criados planos paralelos à superfície do pavimento e secantes aos agregados para gerar as superfícies que irão simular a área envolvida pela borracha do pneu.

Para gerar um modelo que recrie as condições reais da superfície do pavimento foi necessário conceber uma metodologia analítica para modelar o ensaio da mancha de areia, uma vez que através deste ensaio é possível obter as informações da macrotextura do pavimento real. O ensaio mancha de areia consiste no espalhamento de um volume conhecido de areia de granulometria normalizada.

O resultado do ensaio é dado pela profundidade média de material espalhado, MTD, obtido pela seguinte expressão:

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (2.5)$$

Onde:

MTD [mm] – profundidade média da textura superficial;

V [mm³] – volume de material espalhado;

D [mm] – diâmetro médio do círculo com o espalhamento do material.

Na figura 24 é representado o procedimento para a realização do ensaio mancha de areia.



Figura 24 – Procedimento para a realização do ensaio mancha de areia

Durante o ensaio o material (areia) é espalhado recorrendo a um instrumento normalizado que tem como objetivo espalhar de forma concêntrica e uniforme a areia pela superfície do pavimento. Segundo a Norma EN 13036-1, a areia utilizada tem uma dimensão máxima de 0,250 mm e uma dimensão mínima de 0,177 mm. Conforme se vê na Figura 25, durante o processo de espalhamento ficam zonas nas quais não há areia, estas áreas estão em torno dos “cabeços” mais altos da superfície, isto acontece pelo facto dos grãos de areia terem uma dimensão de 0,20 mm em média e durante o espalhamento da areia ser impossível a deposição dos grãos de areia em locais de profundidade inferior. Esta área sem areia é bastante importante, pois ela é a primeira zona de contacto entre o pneu e o pavimento, portanto, uma zona onde a microtextura adquire particular importância.

Na Figura 25 é representado de forma esquemática o processo acima descrito, no qual é possível observar as zonas onde não existe areia.

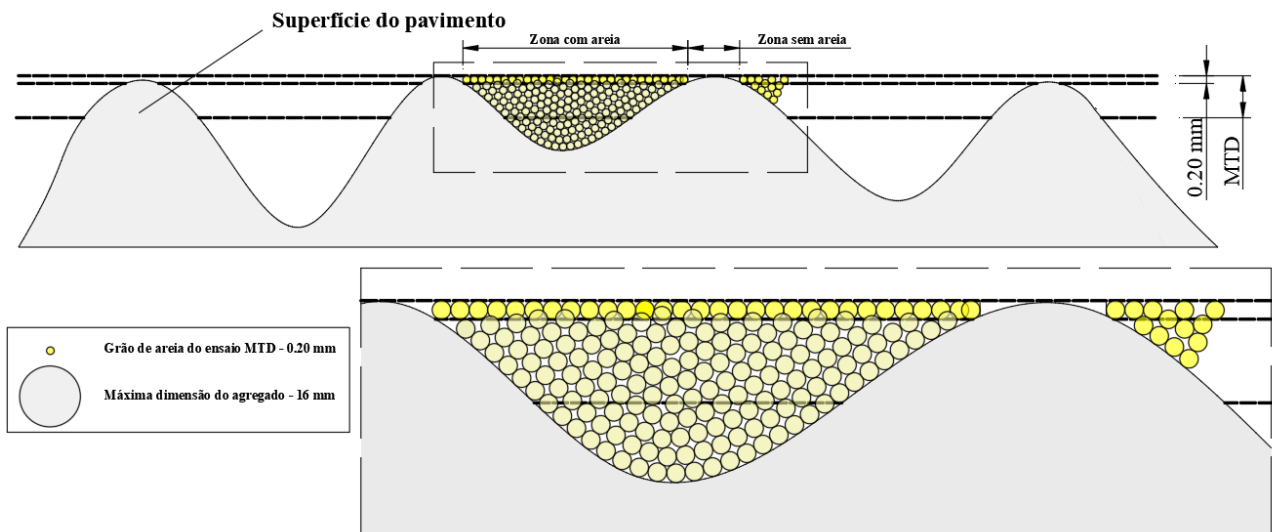


Figura 25 – Representação do ensaio mancha de areia com o arranjo dos grãos de areia

Como referido anteriormente, foi necessário modelar o ensaio de macrotextura para que o modelo geral do pavimento consiga correlacionar-se com características reais que se possam medir.

Para a modelação da superfície do pavimento começou-se por modelar esferas de dimensões variadas, com base no fuso granulométrico da mistura. Tal como ilustra a Figura 26, a esferas representam o corpo de agregados de dimensões superiores a 5 mm.

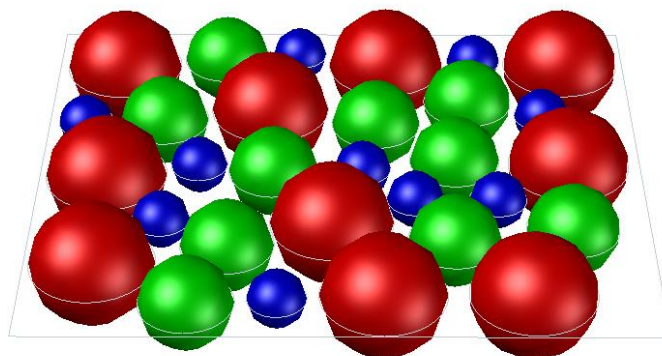


Figura 26 – Corpo de agregado

Em seguida, a fim de obter a primeira área de contacto colocou-se um plano a 0,20 mm do topo das esferas, para que este plano cortasse as esferas, definindo os contornos de pequenos planos, que irão servir como áreas de primeiro contacto com o pneu.

Nas Figuras seguintes é demonstrado o processo de elaboração do protótipo.

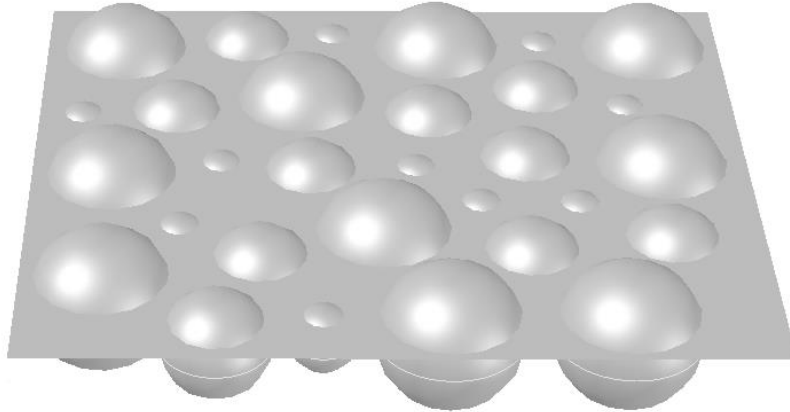


Figura 27 – Plano paralelo ao plano médio do agregado a 0,200 mm do topo

Uma vez definida a área de contacto é necessário agora recriar a macrotextura (MTD) que resulta do ensaio de mancha de areia. Para isso é necessário recorrer novamente a um plano paralelo ao plano médio do agregado, mas que desta vez irá corresponder a altura dada pelo ensaio. A altura do MTD corresponde então a medida do topo do agregado até ao segundo plano.

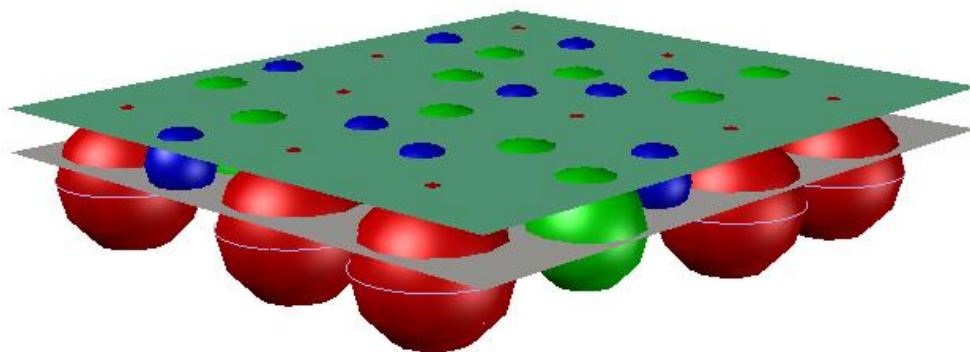


Figura 28 – Corpo de agregado intersetado pelos dois planos paralelos ao plano da superfície (Plano verde corresponde a superfície)

Com a geração deste modelo, vários conceitos ficam estabelecidos, como mostram as figuras seguintes. Na Figura 29 é possível observar a área que corresponde à área preenchida pela areia, ou o espaço (em corte) correspondente aos vazios entre as partículas de agregado. Na Figura 30 é possível observar a primeira área de contacto entre o pneu e o pavimento.

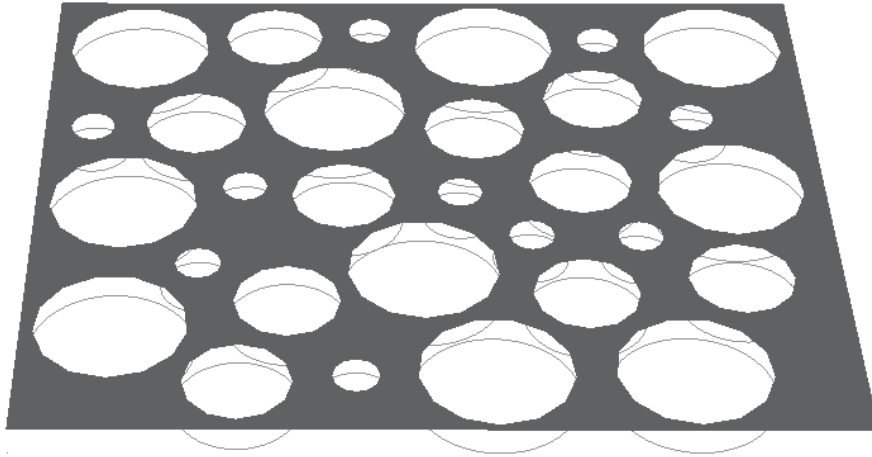


Figura 29 – Espaço correspondente aos vazios entre as partículas de agregado

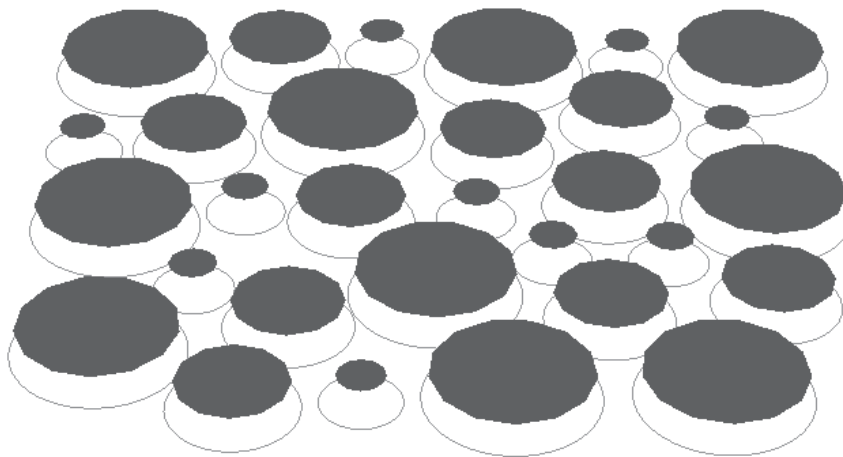


Figura 30 – Área de contacto entre o pneu e o pavimento (primeira área de interação a cinza escuro)

Numa imagem que fique entre os dois planos acima descritos na Figura 28, podemos verificar que o resultado é a produção de um modelo que representa os cabeços do agregado. Na figura 31 é apresentado um exemplo dessa mesma interseção.

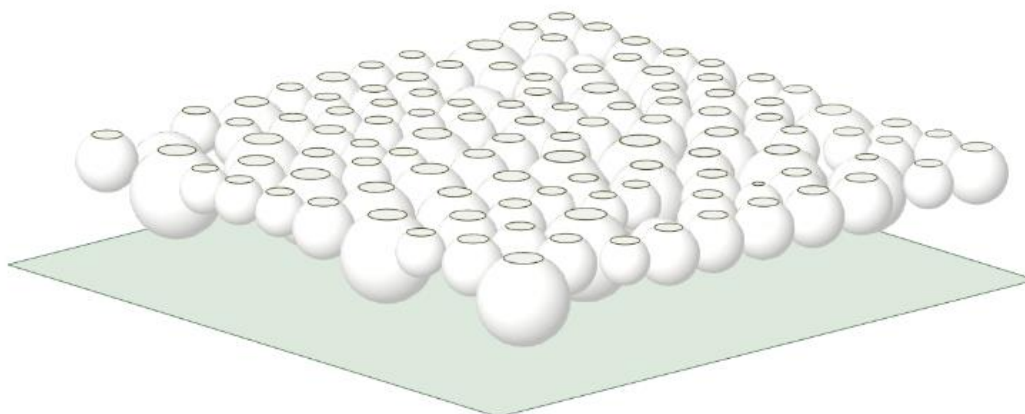


Figura 31 – Representação do agregado cortado pelo plano da macrotextura (MTD)

7.6. Matriz

7.6.1. Considerações gerais

Em toda a mistura betuminosa é necessário a existência dum material que consiga ligar os agregados para que estes se tornem numa estrutura com capacidade de suportar as cargas exigidas, designados por aglutinantes. É, portanto, imperativo que este material tenha uma boa capacidade de adesividade ao agregado. Há muitos materiais com capacidade de serem usados com ligantes no fabrico de misturas betuminosas. Porém atualmente usam-se principalmente produtos derivados da destilação do petróleo bruto, os betumes asfálticos. (Branco et al., 2016)

7.6.2. Modelação do material da matriz

Tal como referido anteriormente, há, portanto, a necessidade de ligar as partículas de agregado grosso (maiores que 5 mm) no modelo. Para isso foi criada uma camada de matriz, com propriedades que representam esse mesmo material, camada castanha na figura 32.

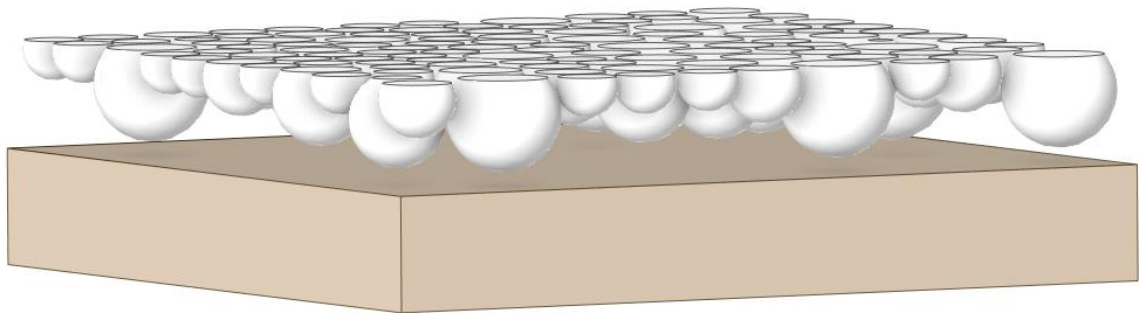


Figura 32 – Matriz e agregado

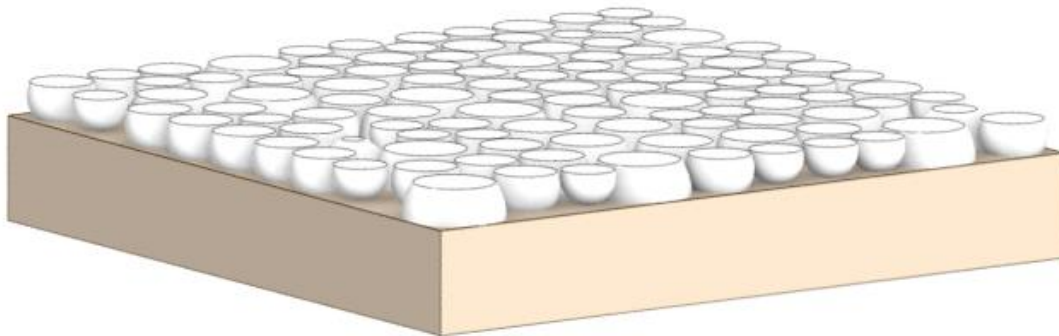


Figura 33 – Agregados parcialmente encrostados na matriz

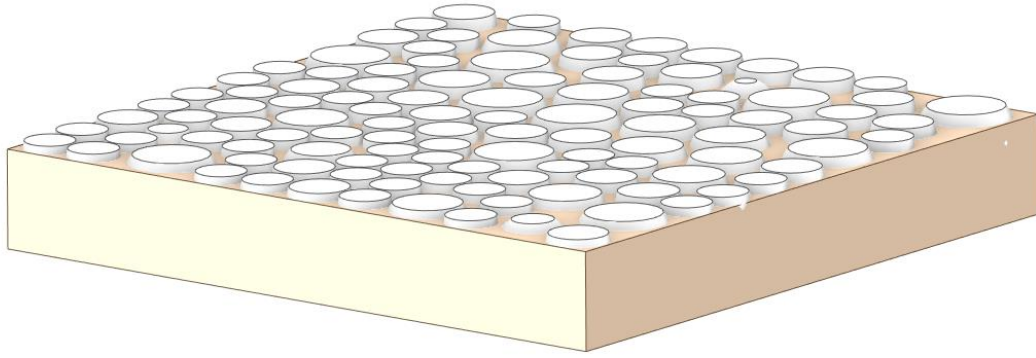


Figura 34 – Agregados grossos embebidos na matriz fina

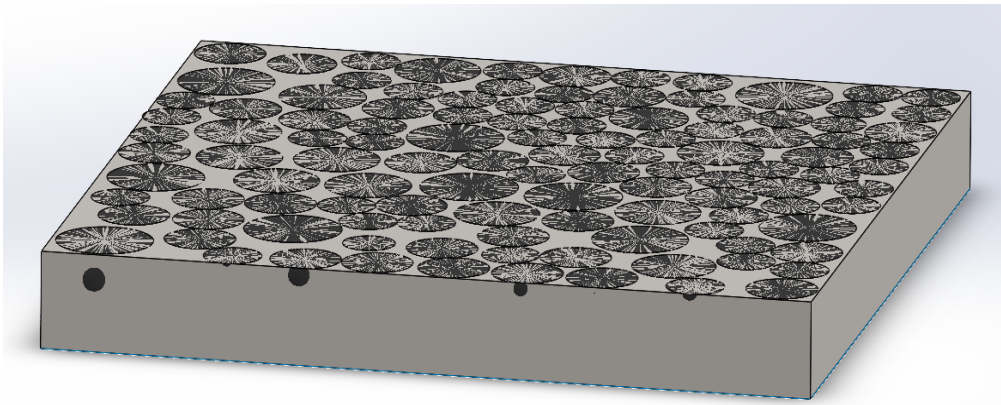


Figura 35 – Agregados totalmente embebidos na matriz, com corte pelo plano MTD

Capítulo 8

Modelação das texturas das superfícies das misturas

8. Modelação das texturas das superfícies das misturas

8.1. Considerações gerais

Uma vez concluída a fase de construção do modelo a utilizar é possível proceder à simulação da passagem da roda sobre o pavimento modelado. Atualmente é de extrema importância conseguir modelos de simulação para diferentes tipos de condições do pavimento, pois através do estudo e análise do seu comportamento é possível prever e explorar a suas capacidades e limitações no mundo real.

Na Figura 36 é representado o modelo do pavimento geral com o pneumático.

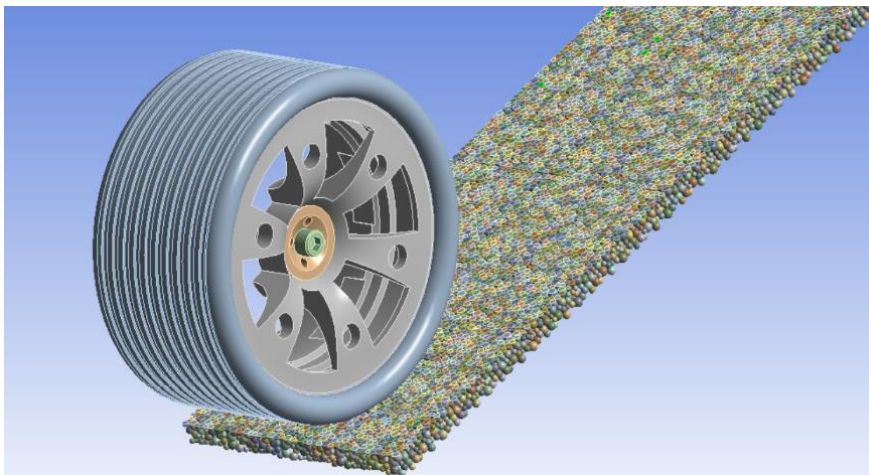


Figura 36 – Modelo do pavimento geral no programa Ansys

8.2. Materiais e simplificações adotadas

Para o modelo considerou-se que o agregado é composto por material de origem granítica. A matriz, como é composta pelo material betuminoso e também por algum agregado de menor dimensão, terá que ter uma porosidade que simule o conjunto destes materiais. Na Figura 37 é representado a matriz e o agregado no modelo.

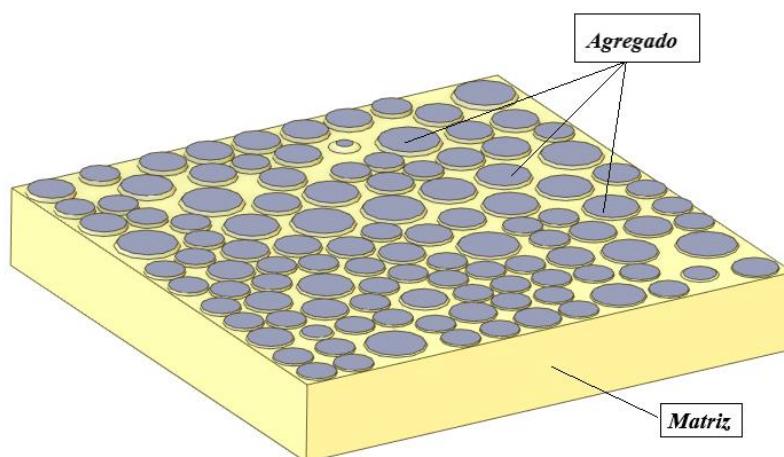


Figura 37 – Representação da matriz e do agregado no modelo

Para carregar o modelo optou-se por simular a ação gerada por um pneu de um veículo ligeiro de passageiros com as características apresentadas no Quadro 14.

Quadro 14 – Características adotadas para o carregamento

Peso do veículo	1500 kg
Peso por eixo	750 kg
Pressão de enchimento	200 kPa
Área de contacto	9.8 cm ²

8.3. Modelação da superfície da mistura BB

Com base na metodologia apresentada é possível representar diferentes tipos de texturas do pavimento para situações reais, do quais é possível destacar o desgaste devido ao polimento do agregado e para situações como a presença de água sobre o pavimento.

Para tal é apresentado um conjunto de imagens que representam diferentes cenários de pavimentos. Foram então efetuados para os três tipos de misturas modelos sem desgaste com macrotextura correspondentes a 0,5 mm, 0,8 mm e 1,0 mm. Modelos com desgaste de 0,3 mm e uma macrotextura de 0,7 mm. E ainda modelos com desgaste de 0,3 mm uma macrotextura de 0,7 mm, com a macrotextura preenchida por água de 10 %, 50 %, 100 % e 120 %.

8.3.1. Modelo de uma mistura BB sem desgaste com $MTD = 0,5 \text{ mm}$

Em primeiro é apresentado um modelo no qual representa um pavimento sem desgaste, onde as partículas do agregado são arredondadas e com uma macrotextura de 0,5 mm de profundidade. Estas condições são representativas de um pavimento no seu estado inicial onde ainda não está presente a ação do polimento e o material betuminoso se encontra perto da superfície do agregado.

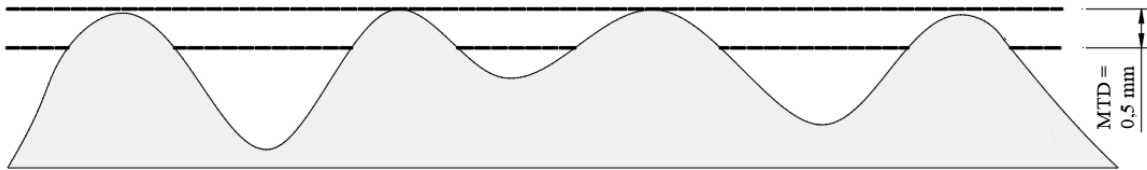


Figura 38 – Condições do modelo BB sem desgaste com $MTD = 0,5 \text{ mm}$

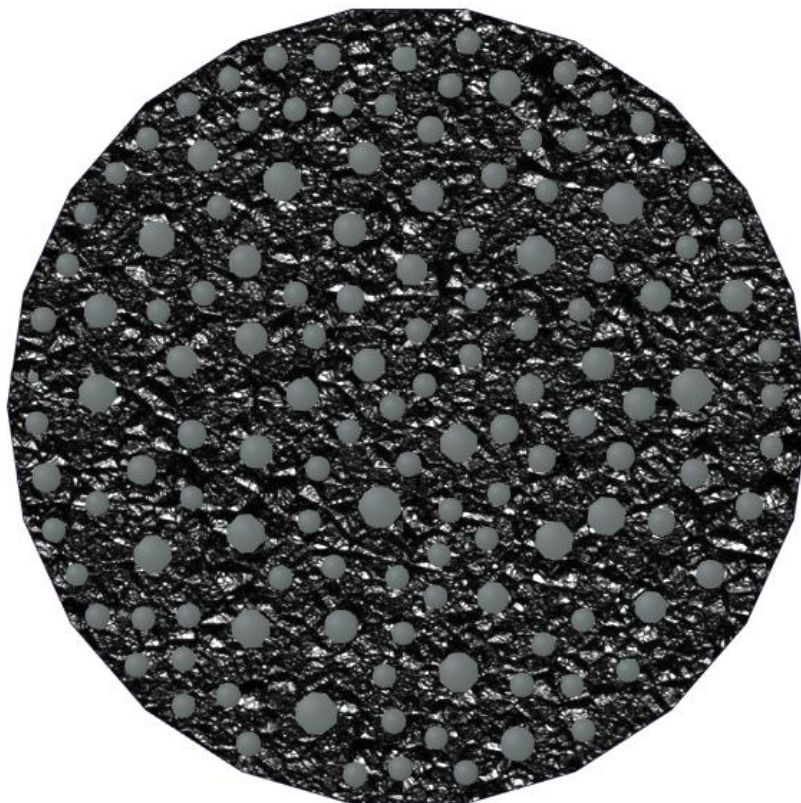


Figura 39 – Planta do modelo da mistura BB sem desgaste com $MTD = 0,5 \text{ mm}$

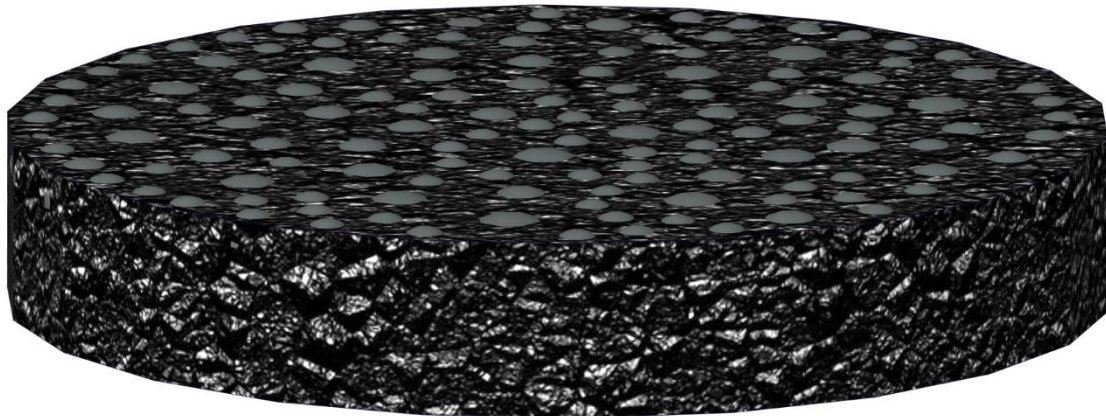


Figura 40 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BB sem desgaste com $MTD = 0,5 \text{ mm}$

8.3.2. Modelo de uma mistura BB sem desgaste com $MTD = 0,8 \text{ mm}$

Na Figura 41 é apresentado um modelo sem desgaste, com uma macrotextura de $0,8 \text{ mm}$ do pavimento.

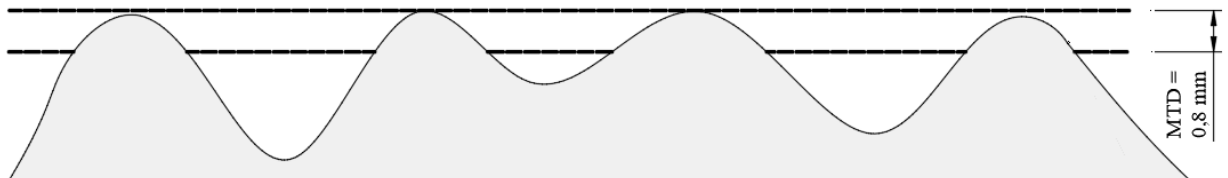


Figura 41 - Condições do modelo BB sem desgaste com $MTD = 0,8 \text{ mm}$

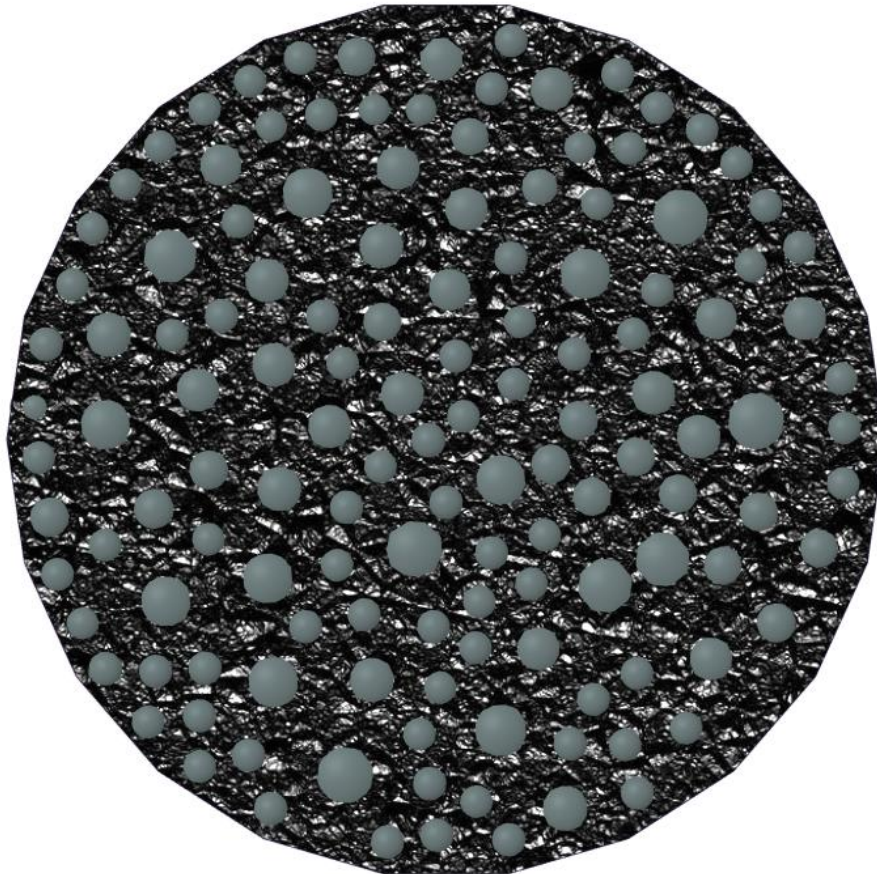


Figura 42 - Planta do modelo da mistura BB sem desgaste com $MTD = 0,8 \text{ mm}$

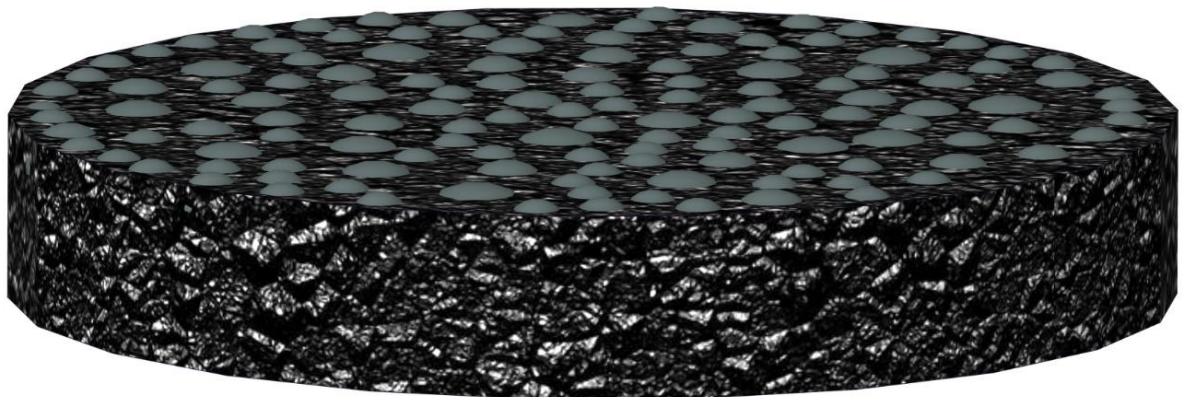


Figura 43 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BB sem desgaste com $MTD = 0,8 \text{ mm}$

8.3.3. Modelo de uma mistura BB sem desgaste com $MTD = 1,0$ mm

Na Figura 44 é apresentado um modelo no qual representa um pavimento sem desgaste, com uma macrotextura de 1,0 mm de profundidade. Estas condições são representativas de um pavimento no seu estado de serviço.

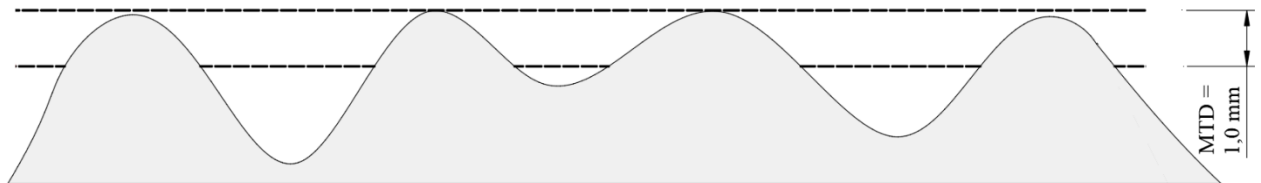


Figura 44 - Condições do modelo BB sem desgaste com $MTD = 1,0$ mm

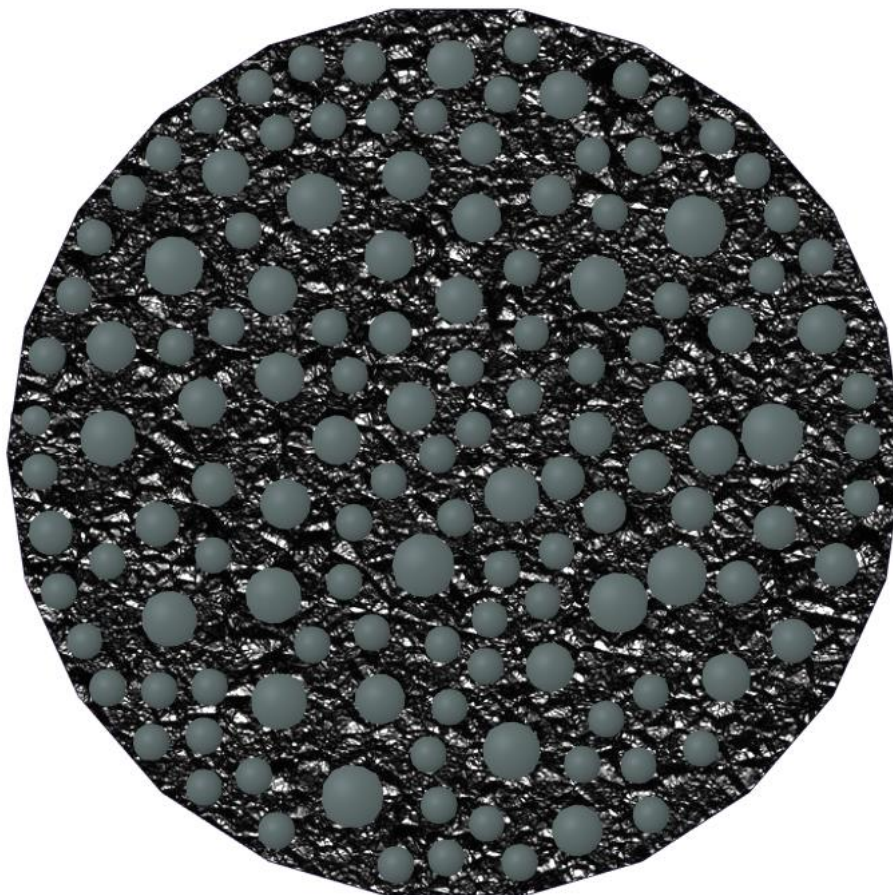


Figura 45 - Planta do modelo da mistura BB sem desgaste com $MTD = 1,0$ mm

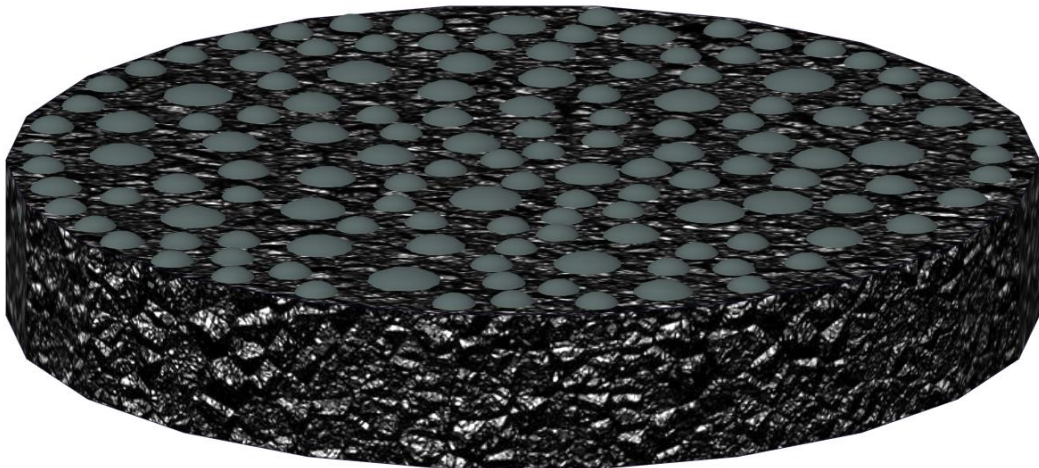


Figura 46 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BB sem desgaste com MTD = 1,0 mm

8.3.4. Modelo de uma mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm

Na Figura 47 é apresentado um modelo que representa um pavimento com desgaste, onde as partículas do agregado foram cortadas por um plano a 0,3 mm do topo do agregado criando um plano que mostra o desgaste provocado pelo polimento dos pneus do veículo e uma macrotextura de 0,7 mm de profundidade.

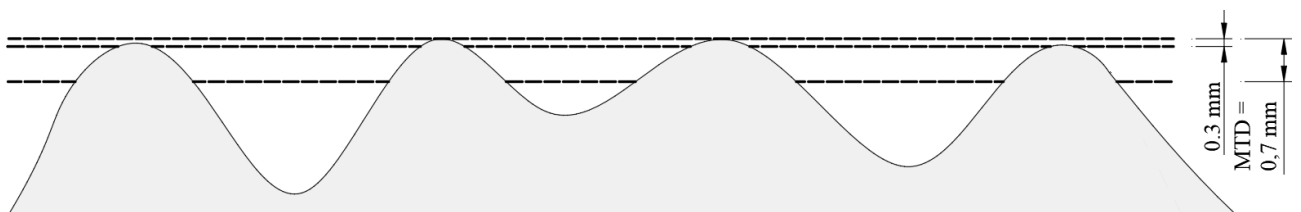


Figura 47 - Condições do modelo BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm

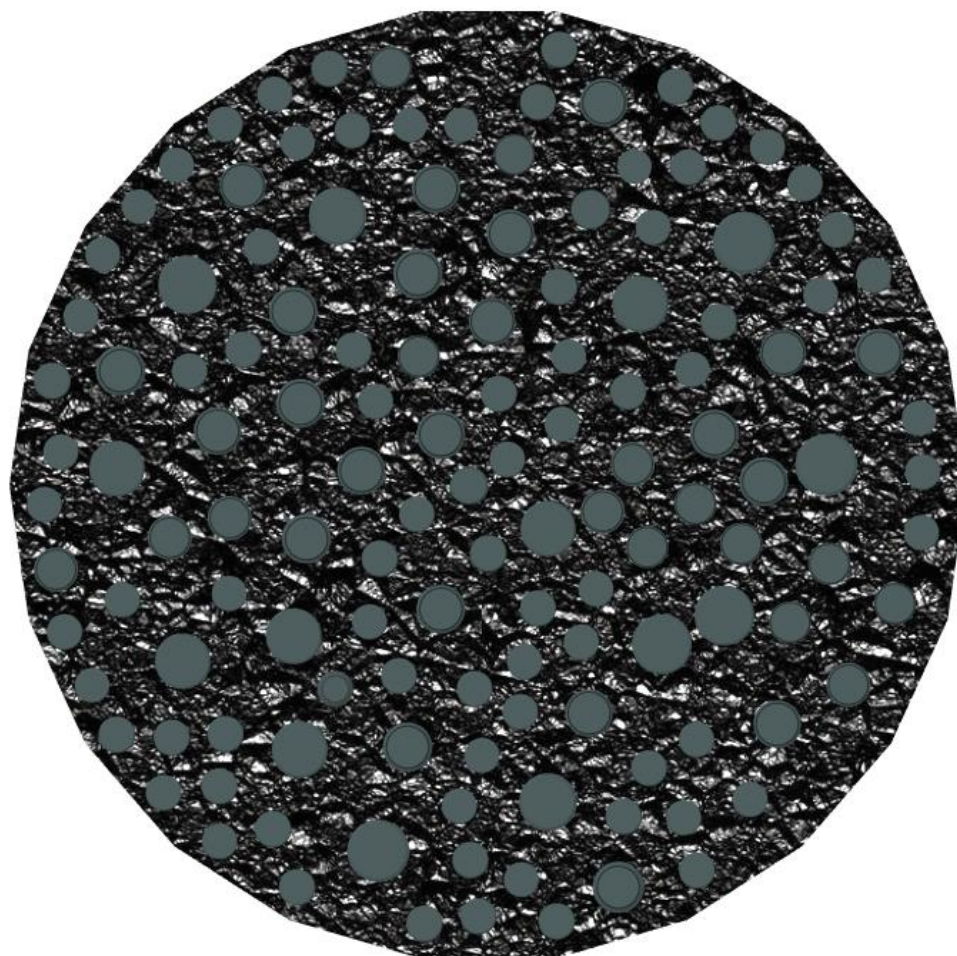


Figura 48 - Planta do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm

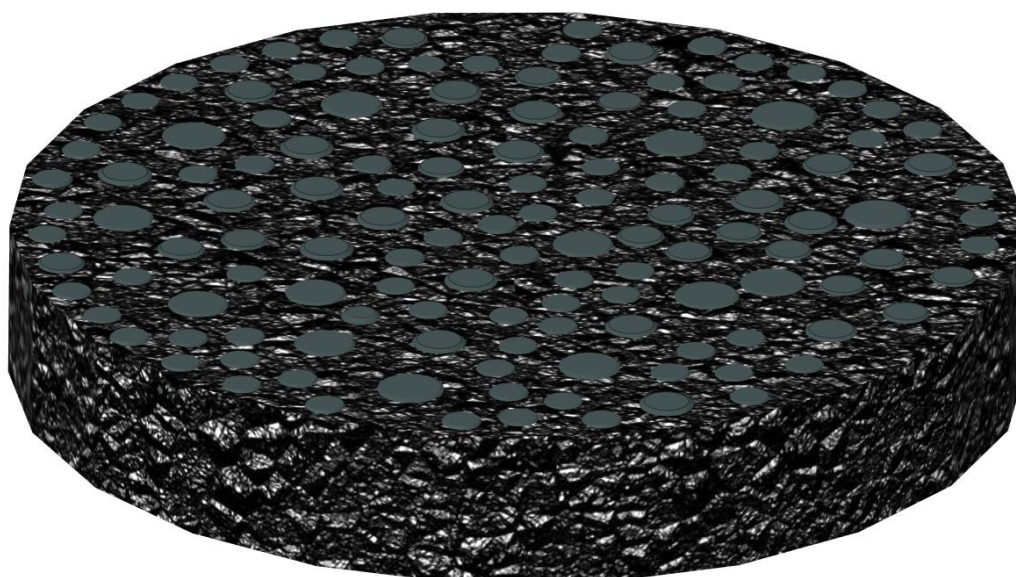


Figura 49 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm

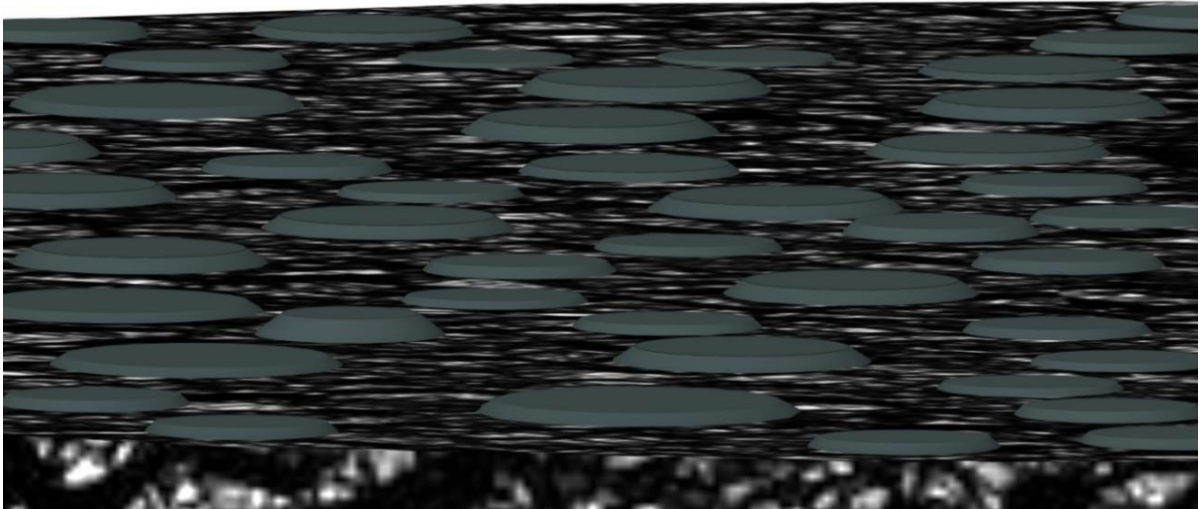


Figura 50 - Vista aproximada dos cabeços do agregado com desgaste

8.3.5. Modelo de uma mistura BB com desgaste de 0,3 mm com $MTD = 0,7$ mm e com uma película de água a 10 % da macrotextura

Na Figura 51 é apresentado um modelo com desgaste a 0,3 mm do topo do agregado e com uma macrotextura de 0,7 mm, onde é colocado uma película de água a 10 % da macrotextura.

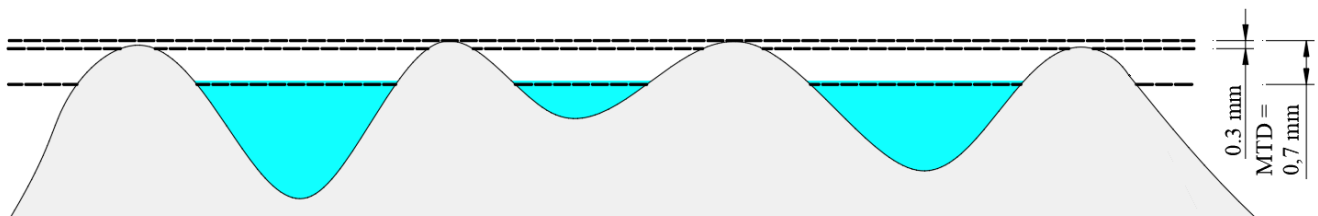


Figura 51 - Condições do modelo BB com desgaste de 0,3 mm com $MTD = 0,7$ mm e uma película de água a 10 % da macrotextura

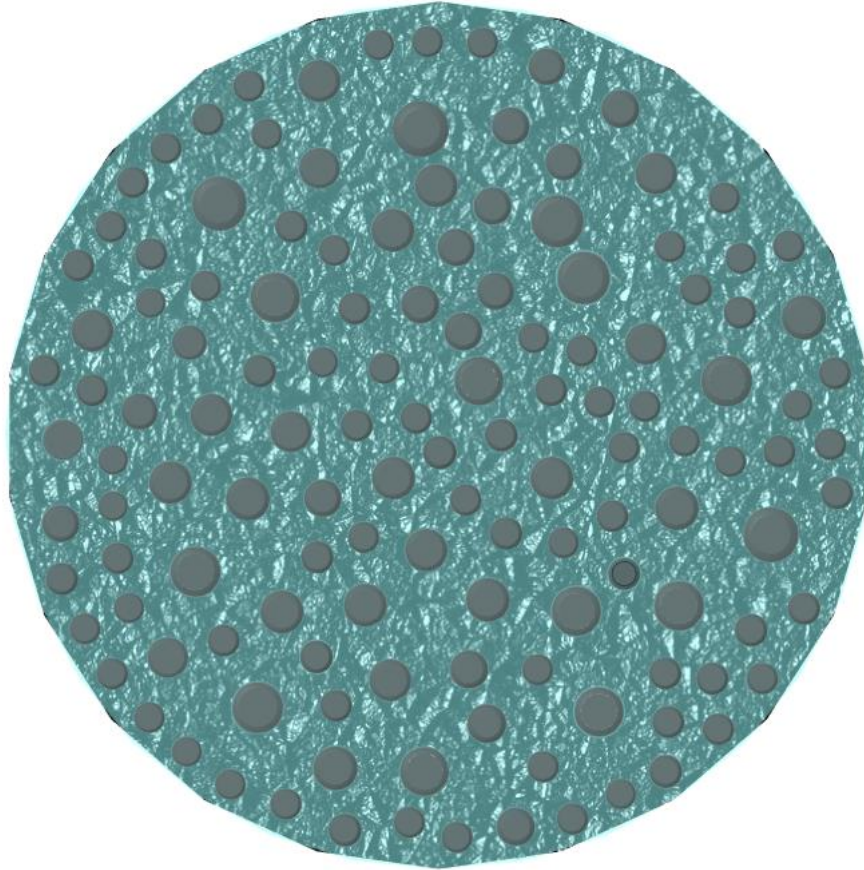


Figura 52 - Planta do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 10 % da macrotextura

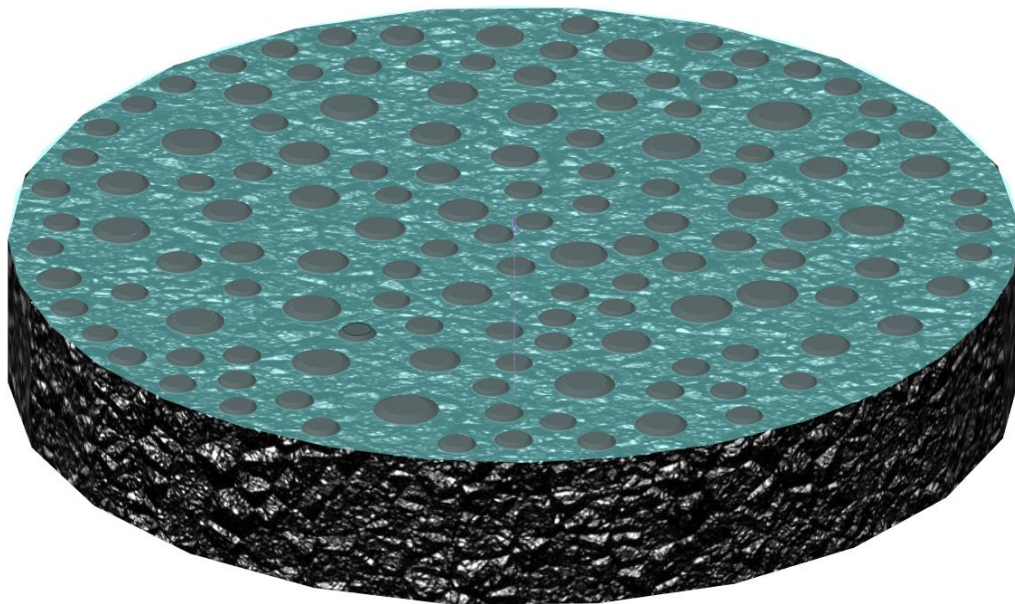


Figura 53 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 10 % da macrotextura



Figura 54 - Vista aproximada dos cabeços do agregado com desgaste e uma película de água a 10 % da macrotextura na mistura BB

8.3.6. Modelo de uma mistura BB com desgaste de 0,3 mm com $MTD = 0,7$ mm e com uma película de água a 50 % da macrotextura

Na Figura 55 é apresentado um modelo com desgaste a 0,3 mm do topo do agregado e com uma macrotextura de 0,7 mm, onde é colocado uma película de água a 50 % da macrotextura.

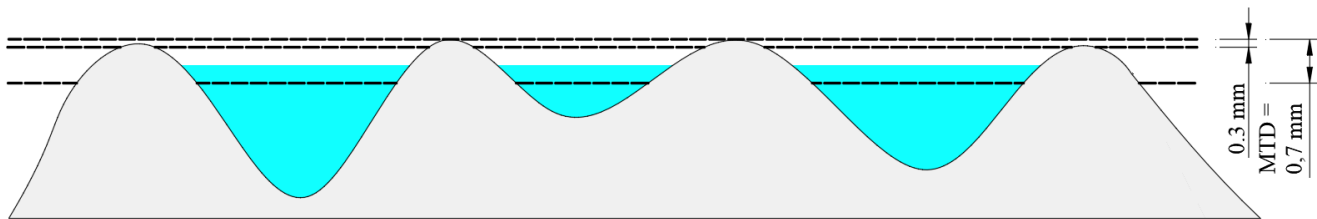


Figura 55 - Condições do modelo BB com desgaste de 0,3 mm com $MTD = 0,7$ mm e uma película de água a 50 % da macrotextura

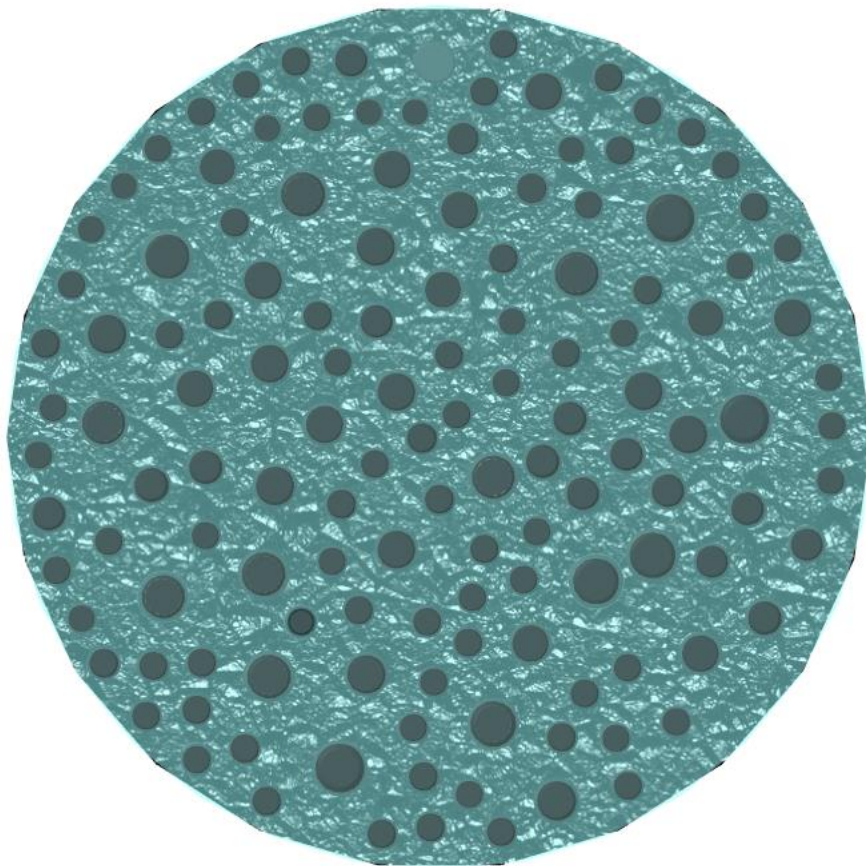


Figura 56 - Planta do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 50 % da macrotextura

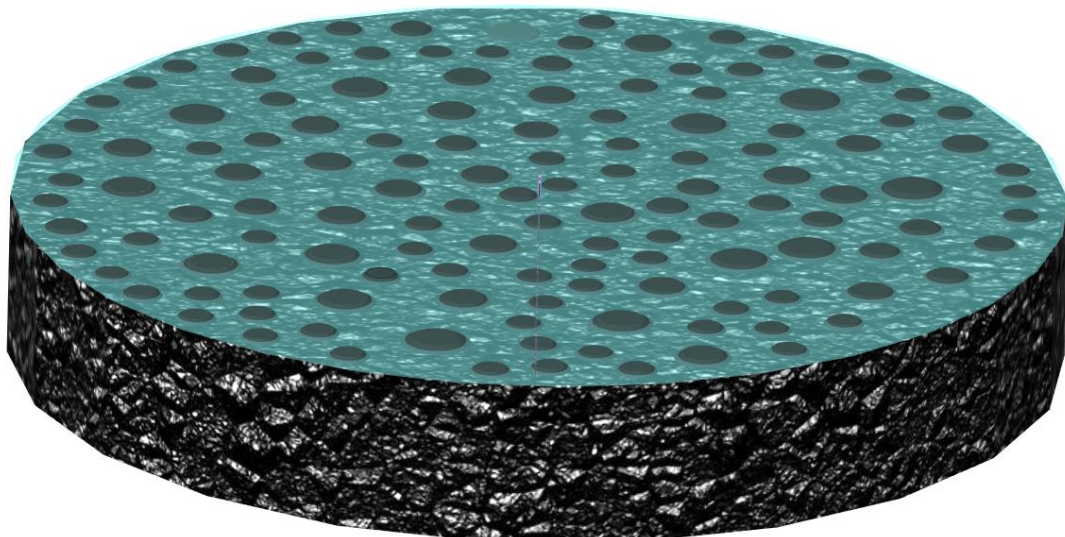


Figura 57 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 10 % da macrotextura



Figura 58 - Vista aproximada dos cabeços do agregado com desgaste e uma película de água a 50 % da macrotextura na mistura BB

8.3.7. Modelo de uma mistura BB com desgaste de 0,3 mm com $MTD = 0,7$ mm e com uma película de água a 100 % da macrotextura

Na Figura 59 é apresentado um modelo com desgaste a 0,3 mm do topo do agregado e com uma macrotextura de 0,7 mm, onde é colocado uma película de água a 100 % da macrotextura.

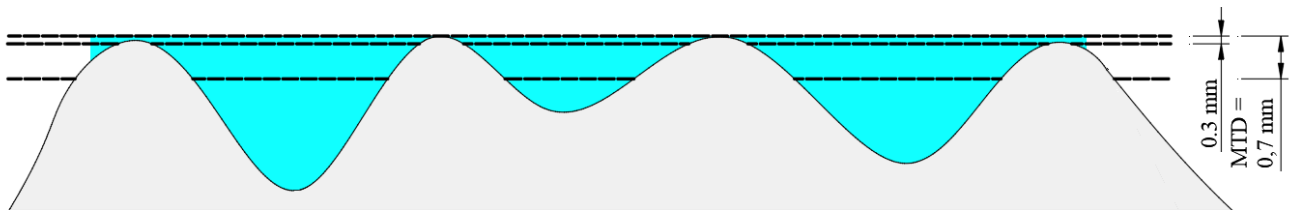


Figura 59 - Condições do modelo BB com desgaste de 0,3 mm com $MTD = 0,7$ mm e uma película de água a 100 % da macrotextura

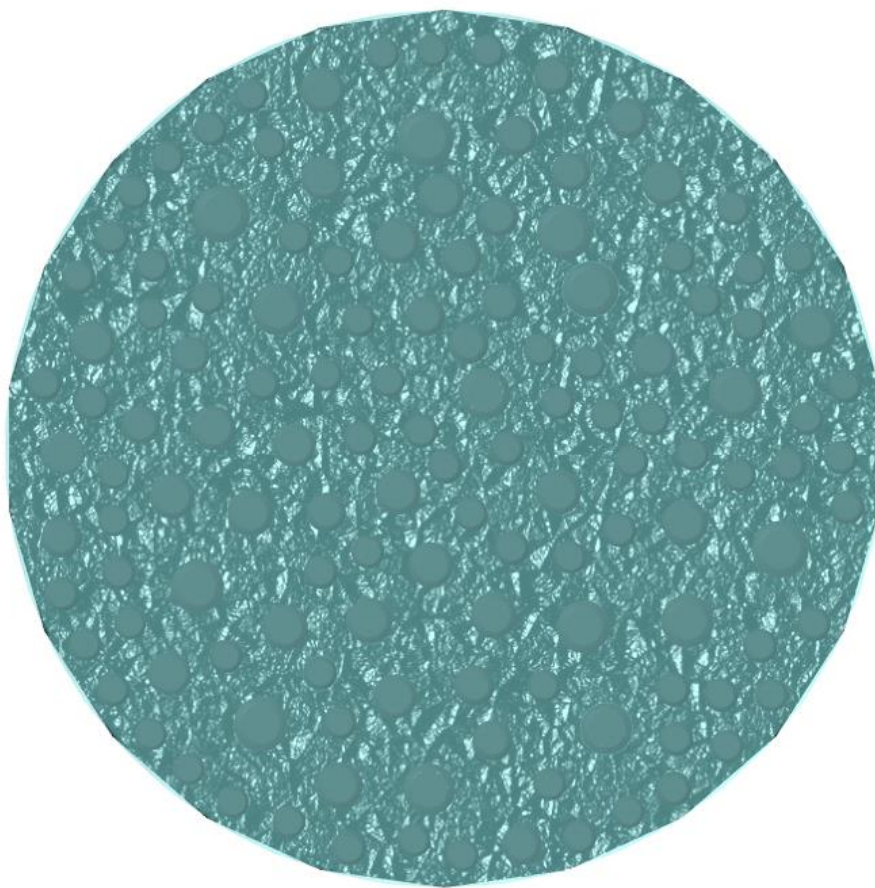


Figura 60 - Planta do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100 % da macrotextura

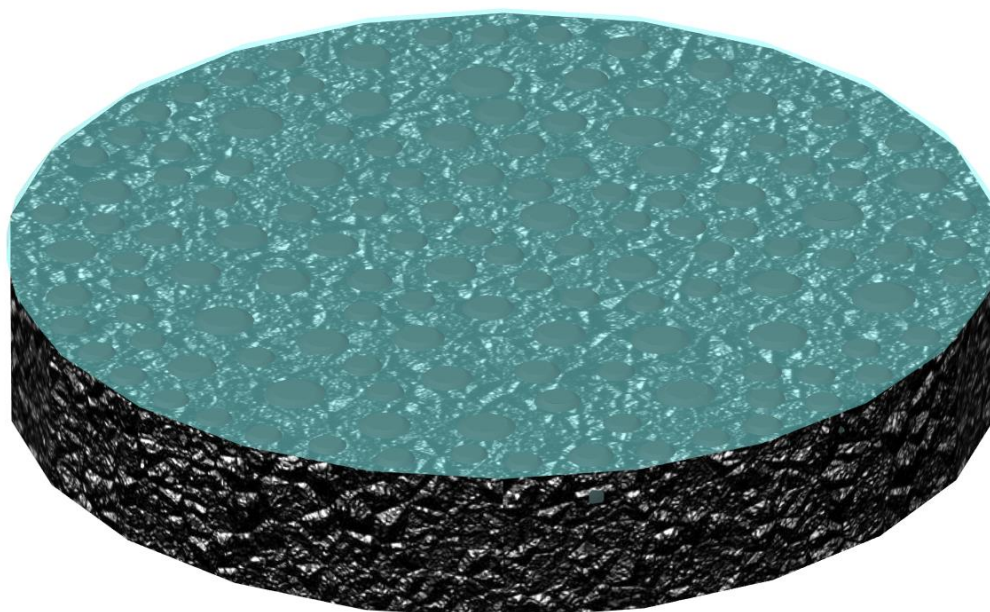


Figura 61 - Vista em perspetiva do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100 % da macrotextura



Figura 62 - Vista aproximada dos cabeços do agregado com desgaste e uma película de água a 100 % da macrotextura na mistura BB

8.3.8. Modelo de uma mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e com uma película de água a 120 % da macrotextura

Na Figura 63 é apresentado um modelo com desgaste a 0,3 mm do topo do agregado e com uma macrotextura de 0,7 mm, onde é colocado uma película de água a 120 % da macrotextura.

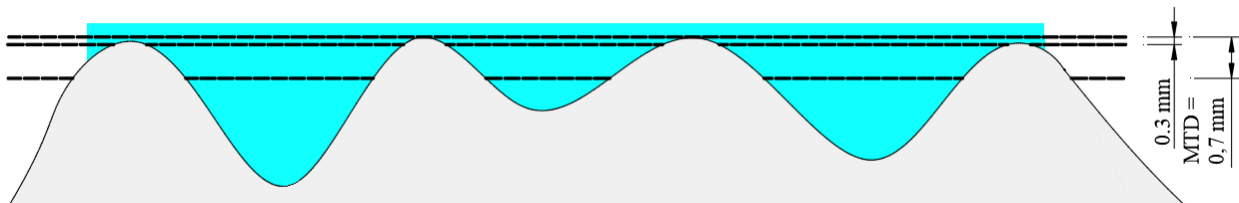


Figura 63 - Condições do modelo BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 120 % da macrotextura

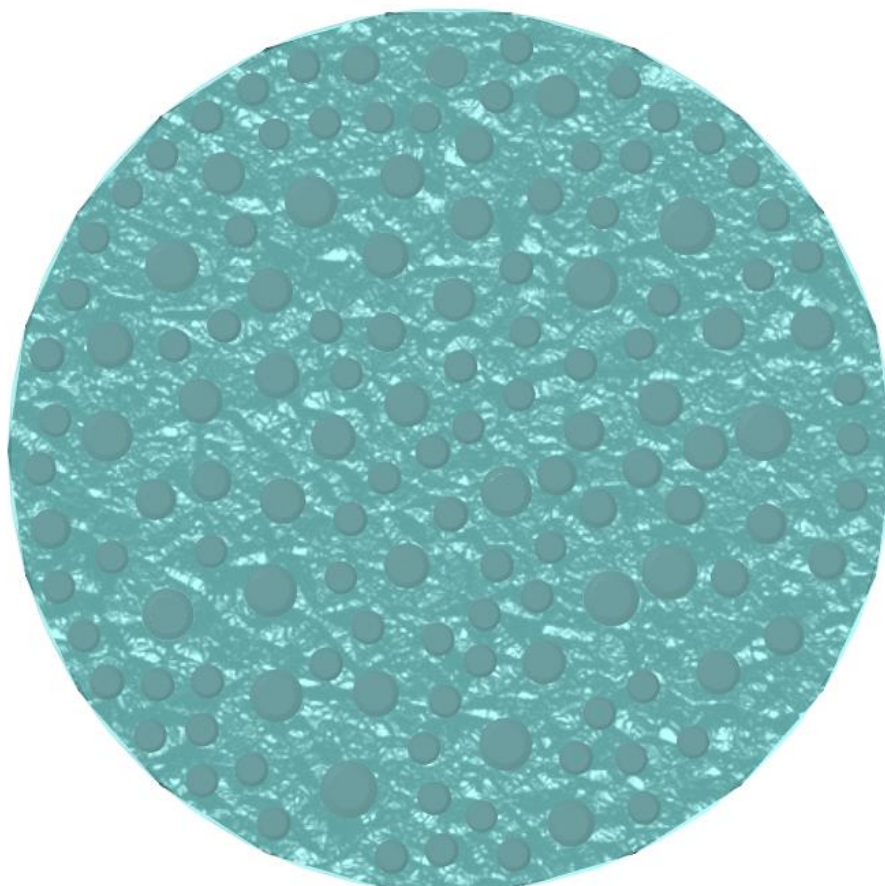


Figura 64 - Planta do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 120 % da macrotextura

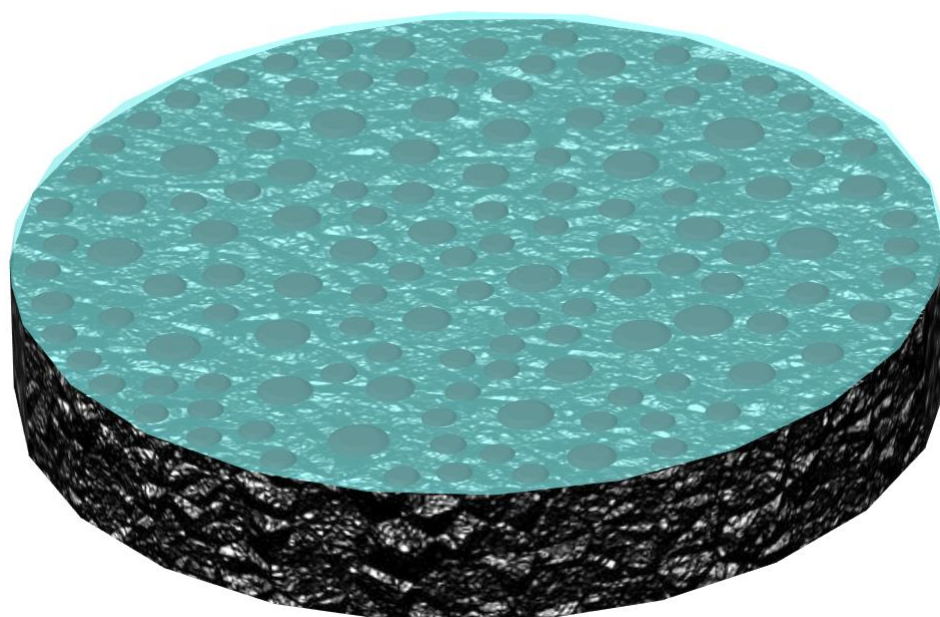


Figura 65 - Vista em perspetiva do modelo da mistura BB com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 120 % da macrot textura

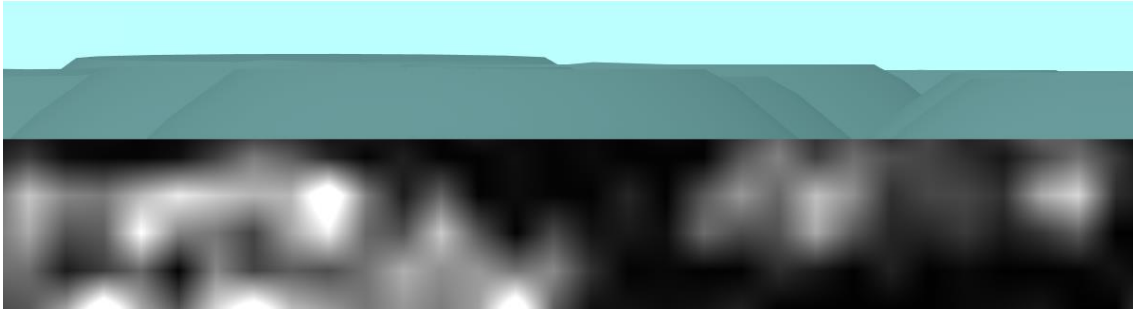


Figura 66 - Vista aproximada dos cabeços do agregado com desgaste e uma película de água a 120 % da macrot textura na mistura BB

8.4. Modelação de uma mistura mBBR

8.4.1. Modelo de uma mistura mBBR sem desgaste com MTD = 0,5 mm

Na Figura 67 é apresentado um modelo que representa um pavimento sem desgaste, onde as partículas do agregado são arredondadas e com uma macrot textura de 0,5 mm de profundidade. Estas condições são representativas de um pavimento no seu estado inicial onde ainda não está presente a ação do polimento e o material betuminoso se encontra perto da superfície do agregado.

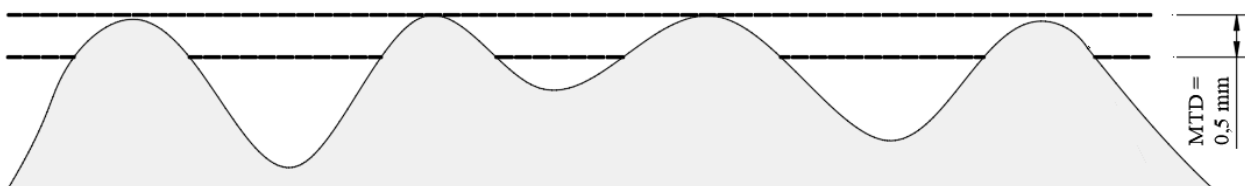


Figura 67 - Condições do modelo mBBR sem desgaste com MTD = 0,5 mm

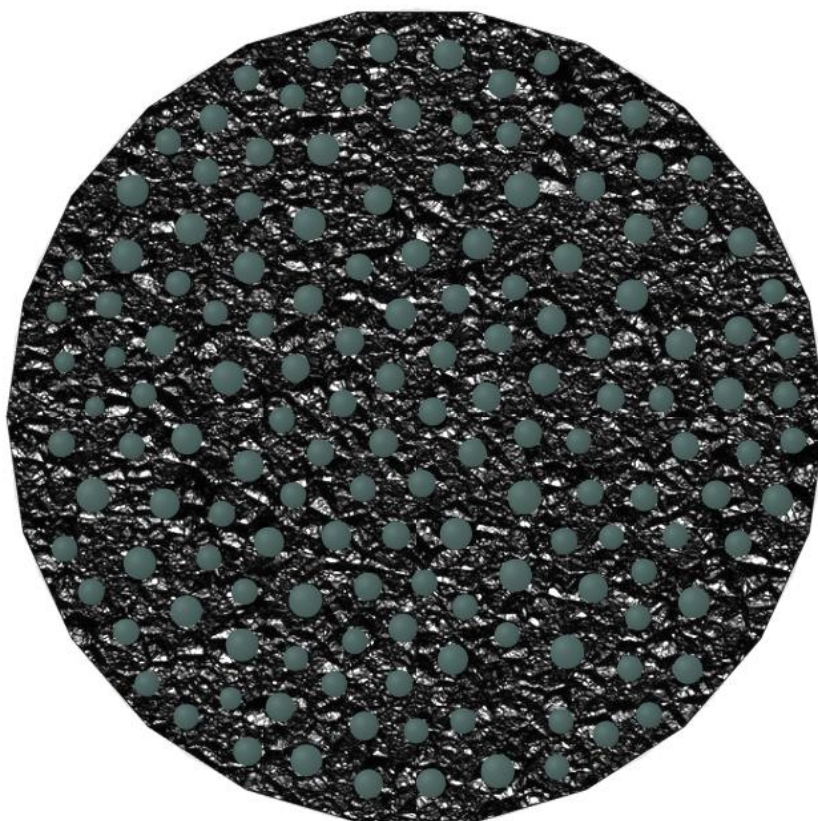


Figura 68 - Planta do modelo da mistura mBBR sem desgaste com MTD = 0,5 mm

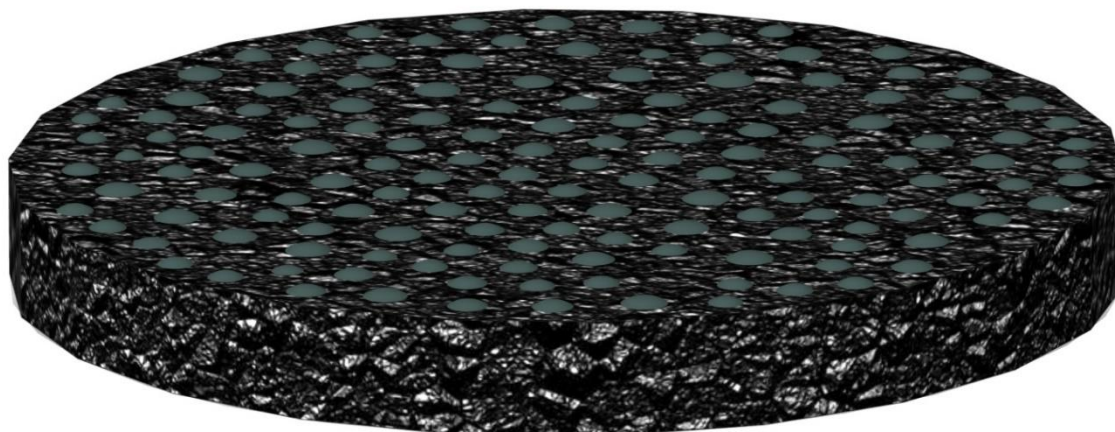


Figura 69 - Vista em perspectiva do modelo da mistura mBBR sem desgaste com MTD = 0,5 mm

8.4.2. Modelo de uma mistura mBBR sem desgaste com $MTD = 0,8 \text{ mm}$

Na Figura 70 é apresentado um modelo no qual representa um pavimento sem desgaste, com uma macrotextura de 0,8 mm de profundidade.

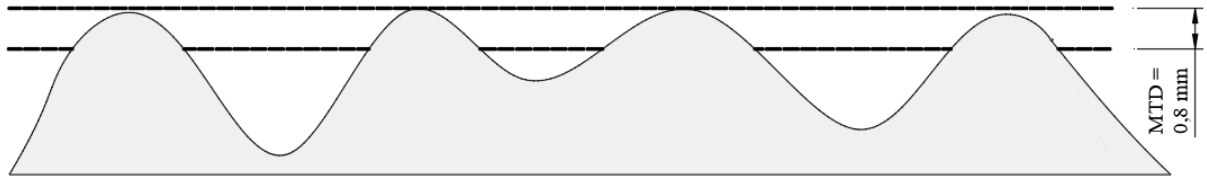


Figura 70 - Condições do modelo mBBR sem desgaste com $MTD = 0,8 \text{ mm}$

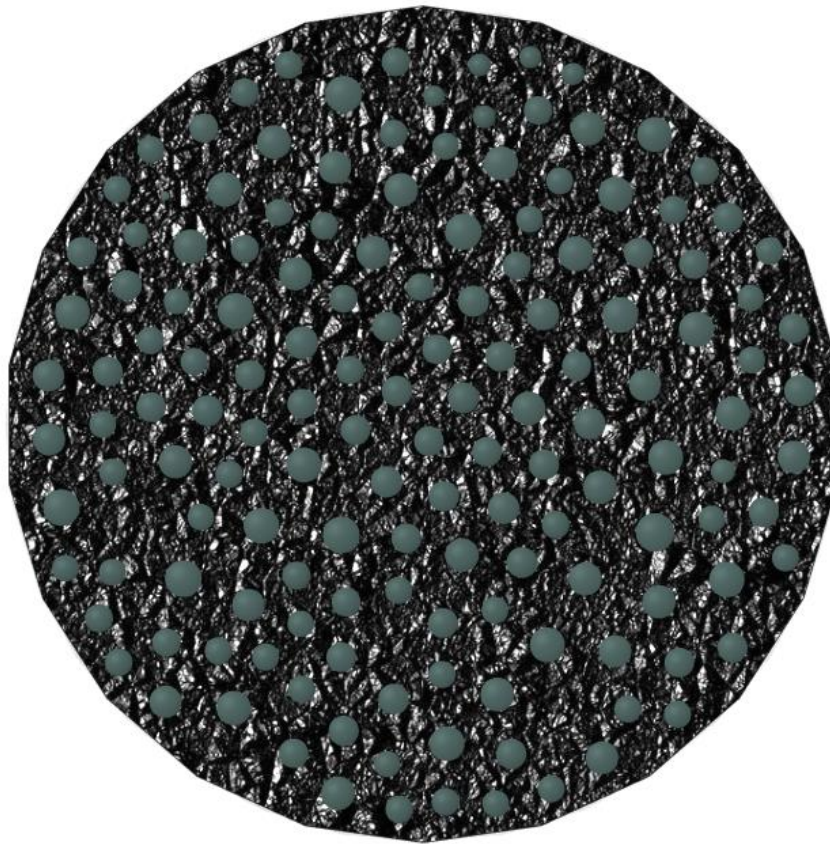


Figura 71 - Planta do modelo da mistura mBBR sem desgaste com $MTD = 0,8 \text{ mm}$

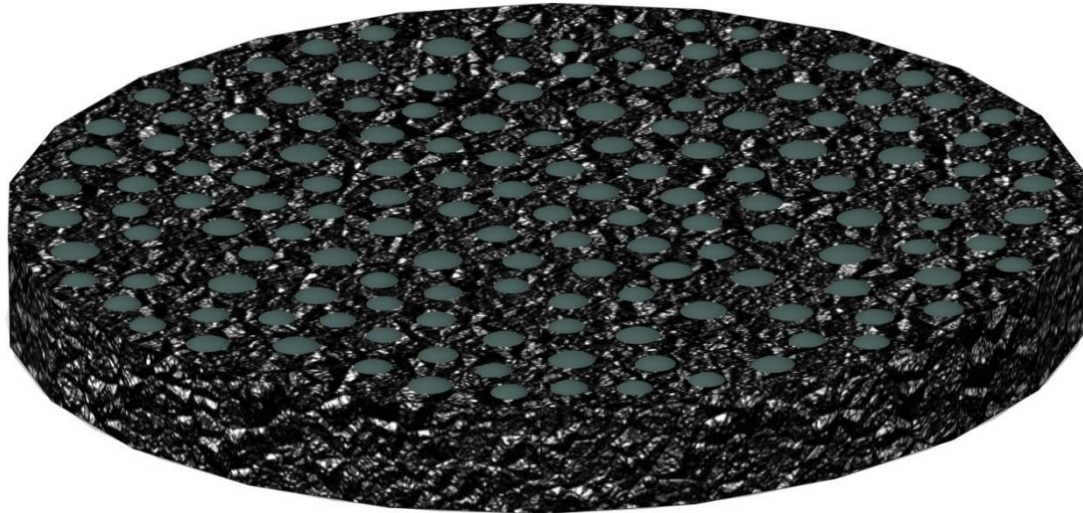


Figura 72 - Vista em perspectiva do modelo da mistura mBBR sem desgaste com MTD = 0,8 mm

8.4.3. Modelo de uma mistura mBBR sem desgaste com MTD = 1,0 mm

Na Figura 73 é apresentado um modelo no qual representa um pavimento sem desgaste, com uma macrotextura de 1,0 mm de profundidade.

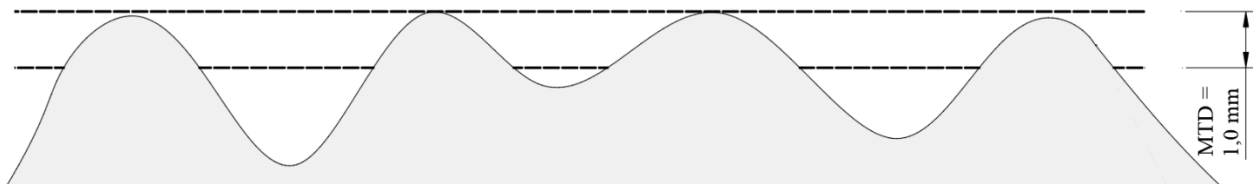


Figura 73 - Condições do modelo mBBR sem desgaste com MTD = 1,0 mm

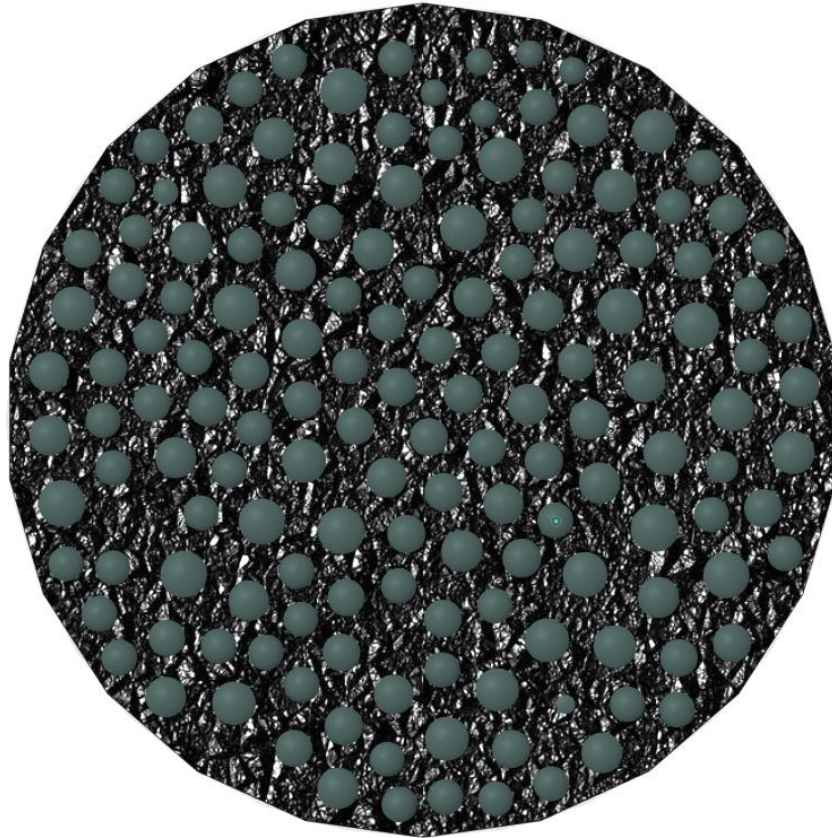


Figura 74 - Planta do modelo da mistura mBBR sem desgaste com MTD = 1,0 mm

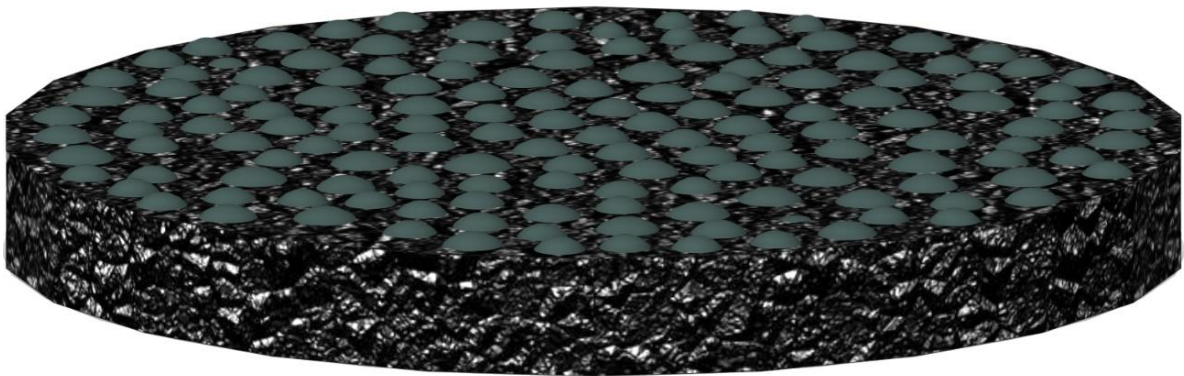


Figura 75 - Vista em perspectiva do modelo da mistura mBBR sem desgaste com MTD = 1,0 mm

8.4.4. Modelo de uma mistura mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm

Na Figura 76 é apresentado um modelo que representa um pavimento com desgaste, onde as partículas do agregado foram cortadas por um plano a 0,3 mm do topo do agregado criando um plano que mostra o desgaste provocado pelo polimento dos pneus do veículo e uma macrotextura de 0,7 mm de profundidade.

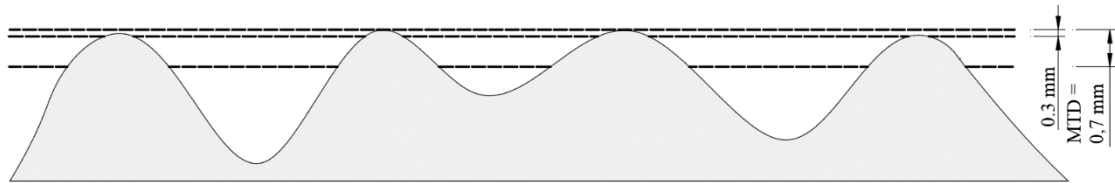


Figura 76 - Condições do modelo mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm

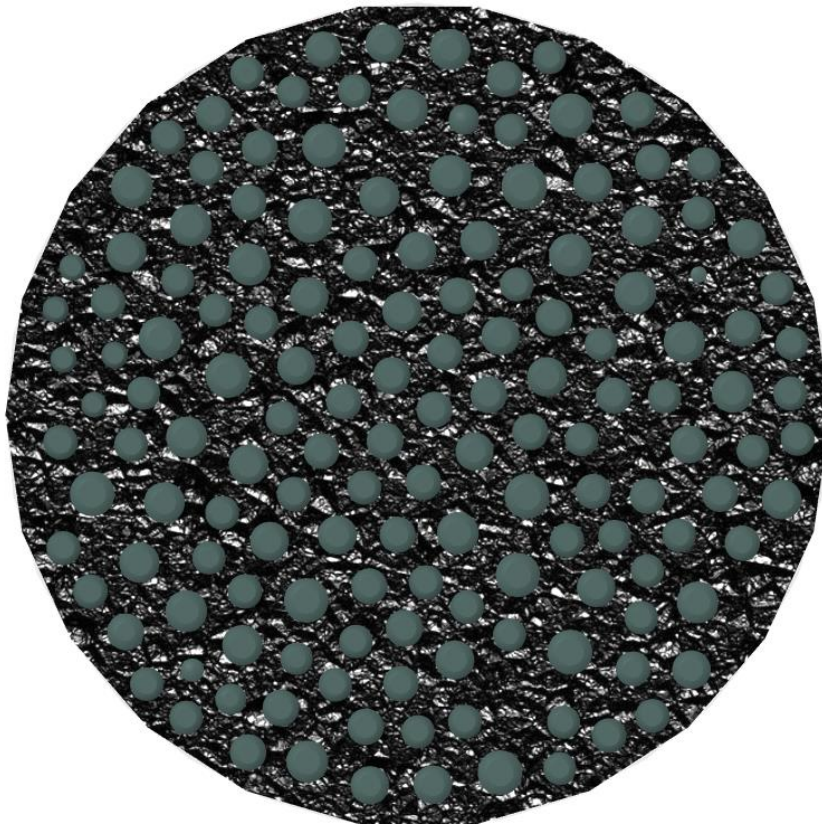


Figura 77 - Planta do modelo da mistura mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm

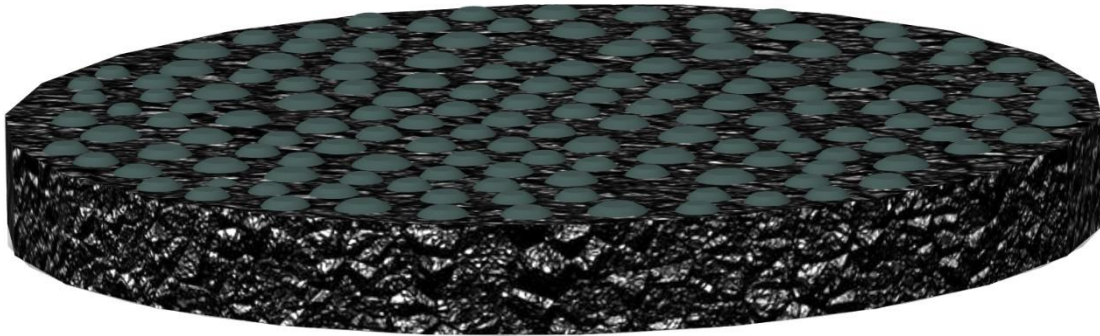


Figura 78 - Vista em perspetiva do modelo da mistura mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm

8.4.5. Modelo de uma mistura mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100%

Na Figura 79 é apresentado um modelo com desgaste a 0,3 mm do topo do agregado e com uma macrotextura de 0,7 mm, onde é colocado uma película de água a 100 % da macrotextura.

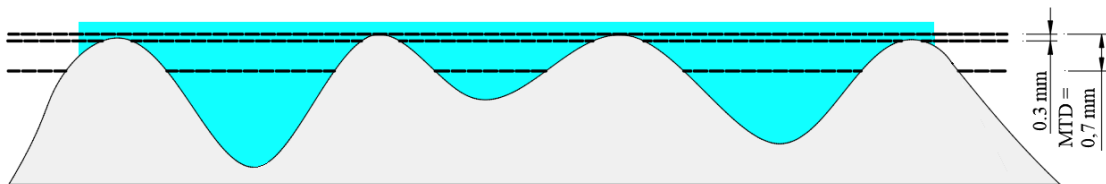


Figura 79 - Condições do modelo mBBR com desgaste de 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura

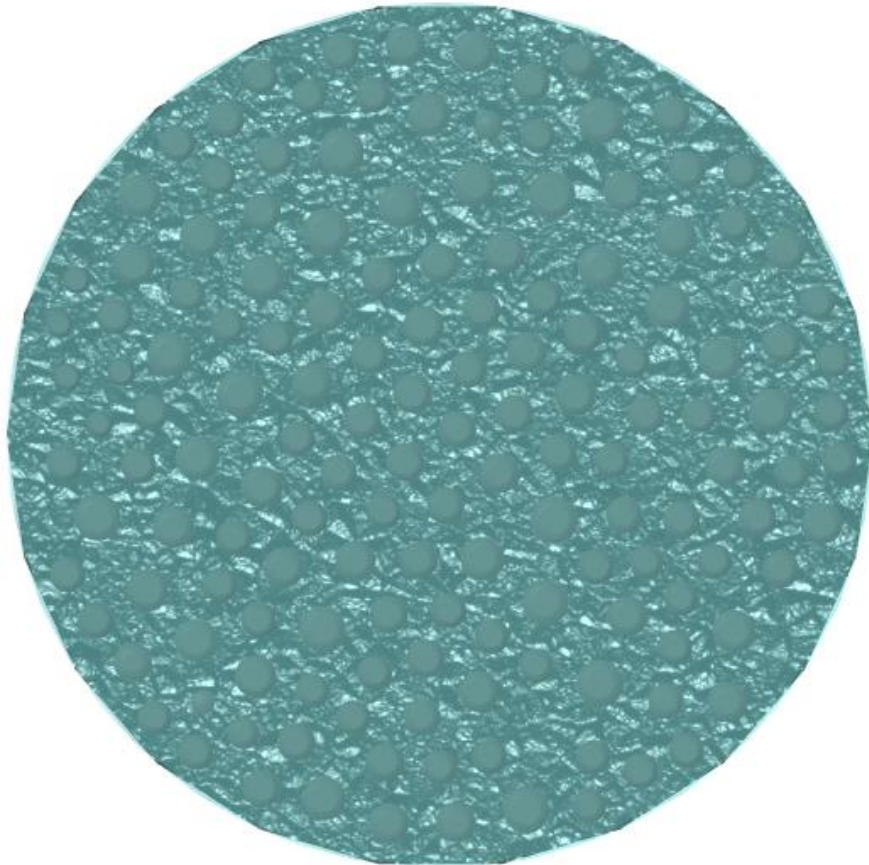


Figura 80 - Planta do modelo da mistura mBBR com desgaste a 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura

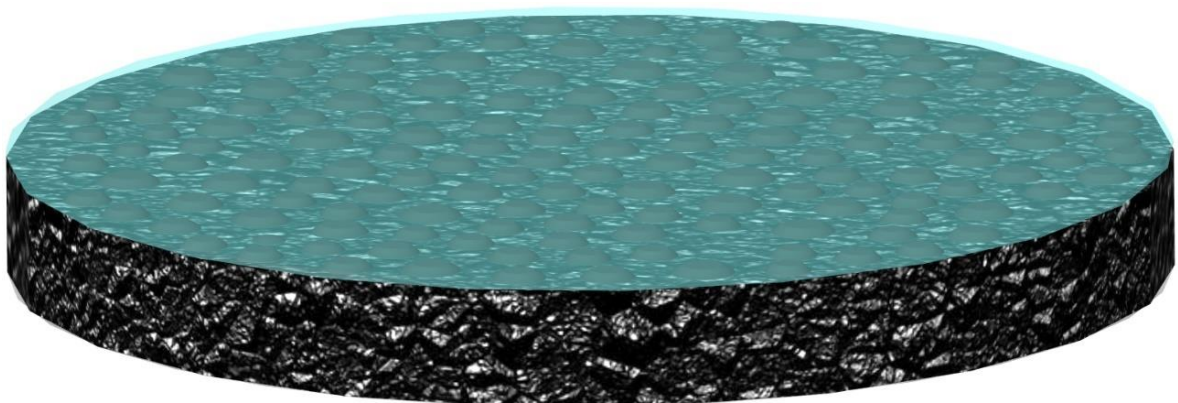


Figura 81 - Vista em perspectiva do modelo da mistura mBBR com desgaste 0,3 mm com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura



Figura 82 - Corte da mistura mBBR com a película de água a 100%

8.5. Modelação de uma mistura BBD

8.5.1. Modelo de uma mistura BBD sem desgaste com um MTD = 0,5 mm

Na Figura 83 é apresentado um modelo no qual representa um pavimento sem desgaste, com uma macrotextura de 0,5 mm de profundidade.

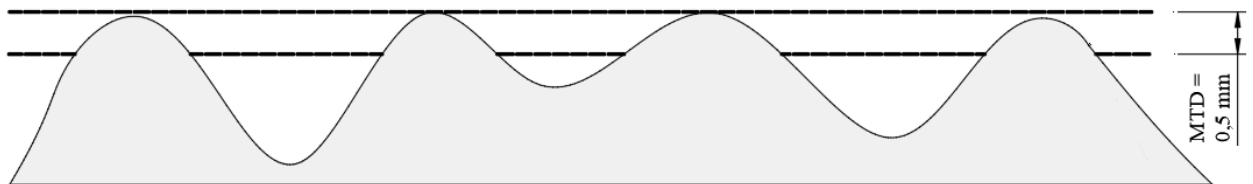


Figura 83 - Condições do modelo BBD sem desgaste com MTD = 0,5 mm

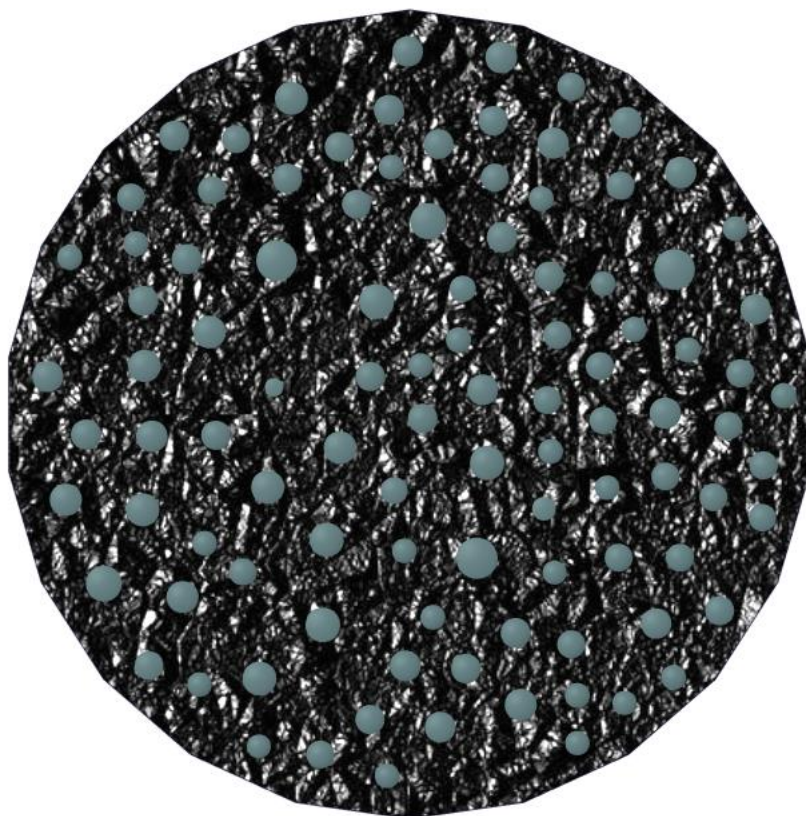


Figura 84 - Planta do modelo da mistura BBD sem desgaste com MTD = 0,5 mm

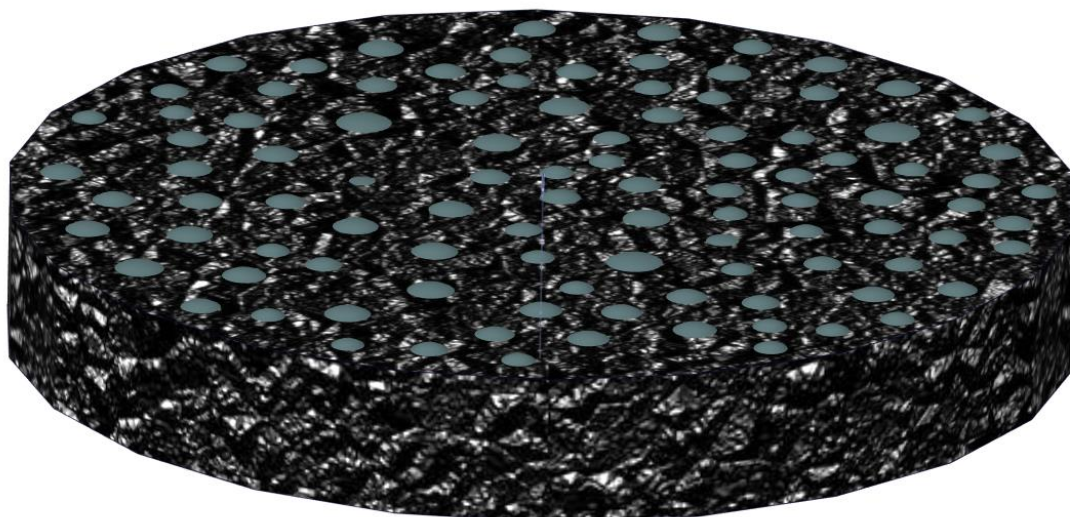


Figura 85 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BBD sem desgaste com MTD = 0,5 mm

8.5.2. Modelo de uma mistura BBD sem desgaste com um MTD = 0,8 mm

Na Figura 86 é apresentado um modelo no qual representa um pavimento sem desgaste, com uma macrotextura de 0,8 mm de profundidade.

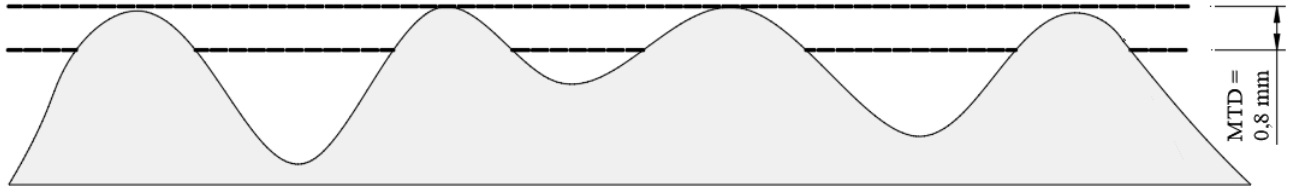


Figura 86 - Condições do modelo BBD sem desgaste com MTD = 0,8 mm

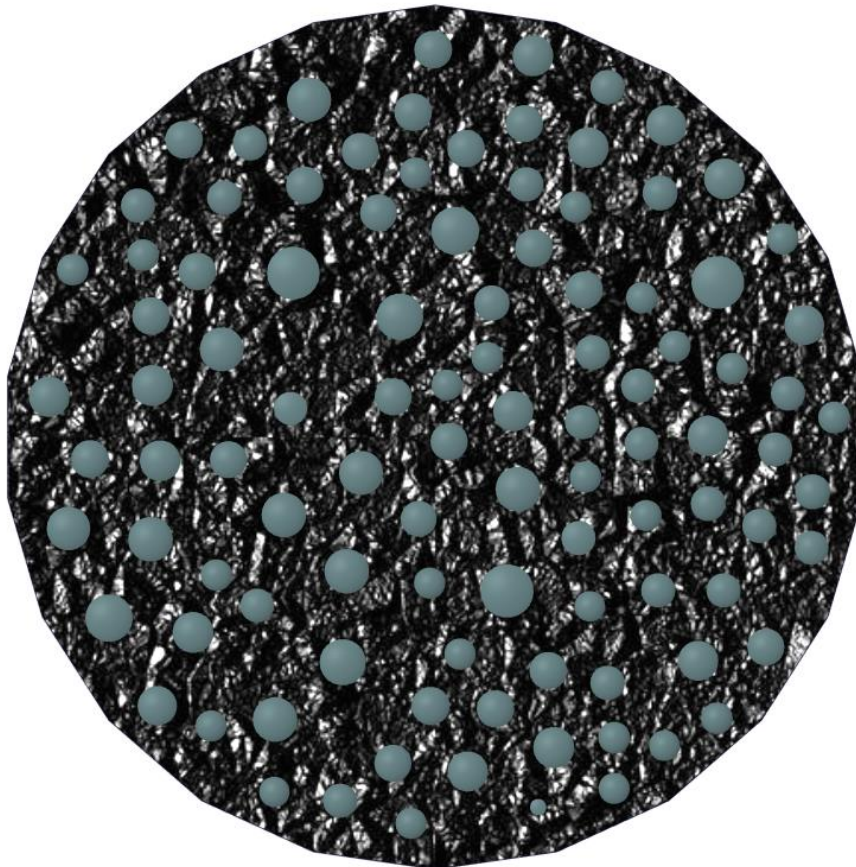


Figura 87 - Planta do modelo da mistura BBD sem desgaste com MTD = 0,8 mm

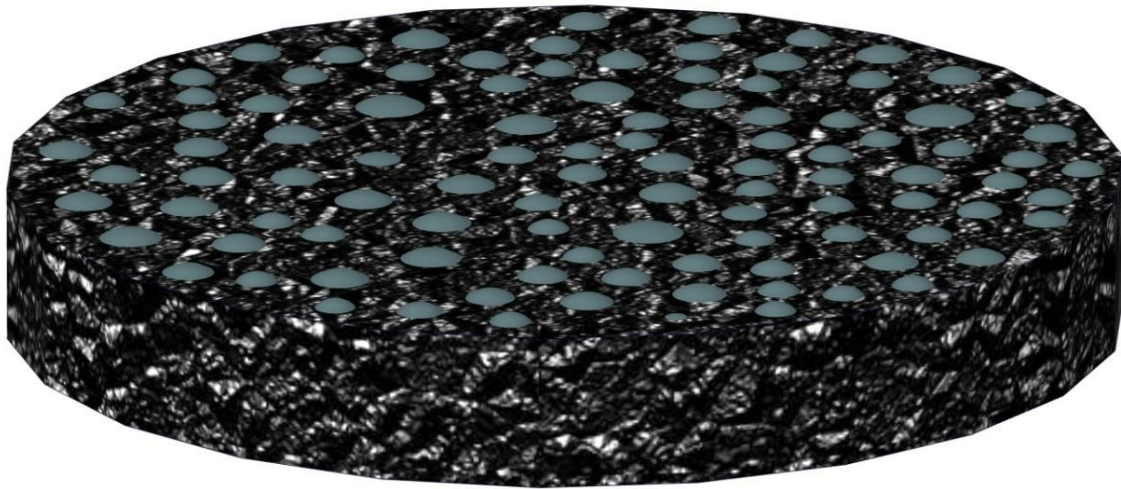


Figura 88 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BBD sem desgaste com MTD = 0,8 mm

8.5.3. Modelo de uma mistura BBD sem desgaste com MTD = 1,0 mm

Na Figura 89 é apresentado um modelo no qual representa um pavimento sem desgaste, com uma macrotextura de 1,0 mm de profundidade.

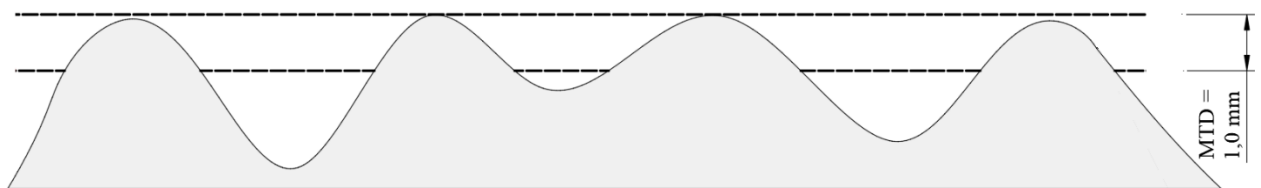


Figura 89 - Condições do modelo BBD sem desgaste com MTD = 1,0 mm

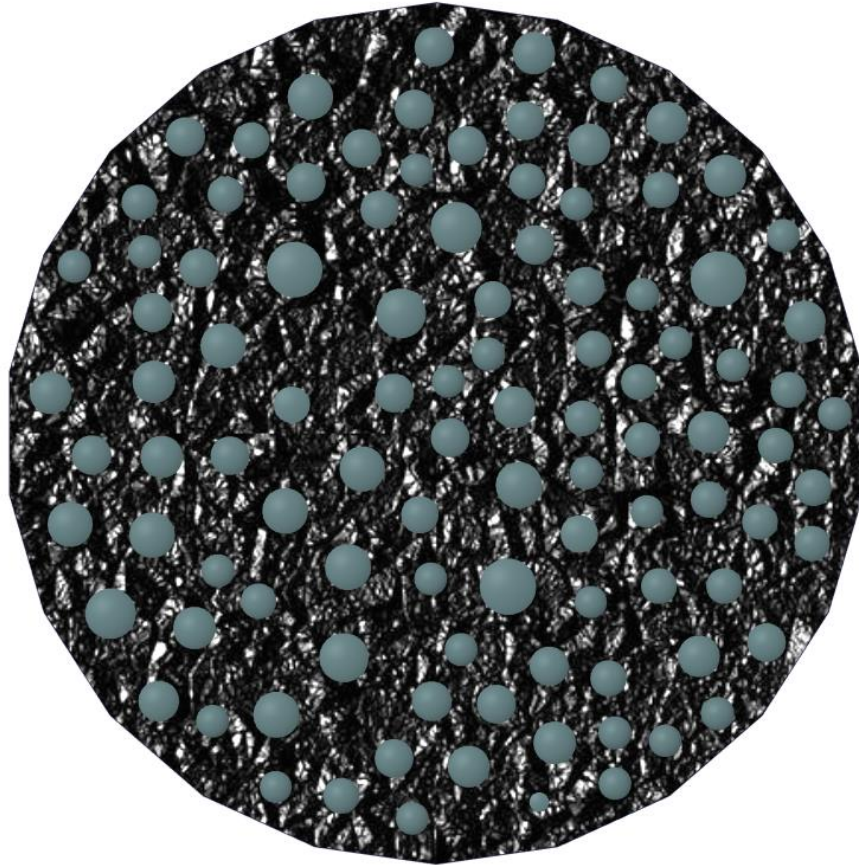


Figura 90 - Planta do modelo da mistura BBD sem desgaste com $MTD = 1,0$ mm

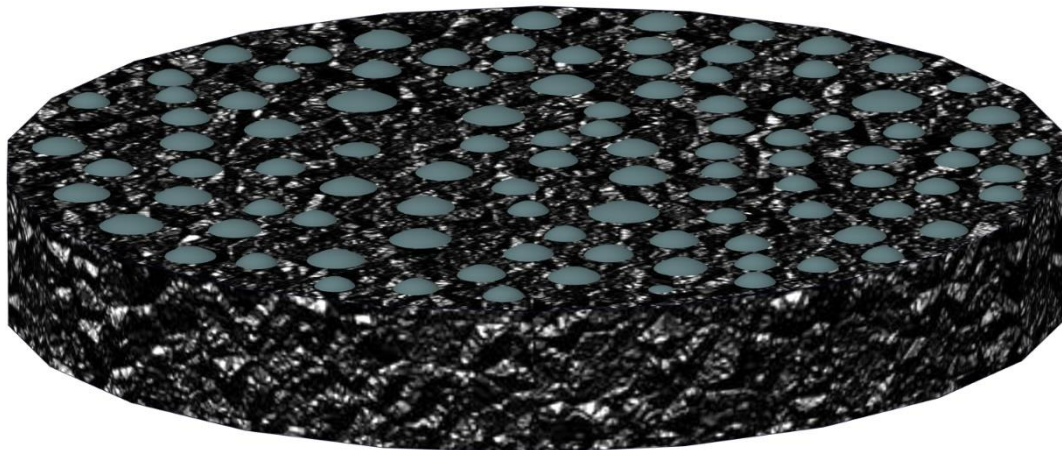


Figura 91 - Vista em perspectiva do modelo da mistura BBD sem desgaste com $MTD = 1,0$ mm

8.5.4. Modelo de uma mistura BBD com desgaste de 0,3 mm e MTD = 0,7 mm

Na Figura 92 é apresentado um modelo que representa um pavimento com desgaste, onde as partículas do agregado foram cortadas por um plano a 0,3 mm do topo do agregado criando um plano que mostra o desgaste provocado pelo polimento dos pneus do veículo e uma macrotextura de 0,7 mm de profundidade.

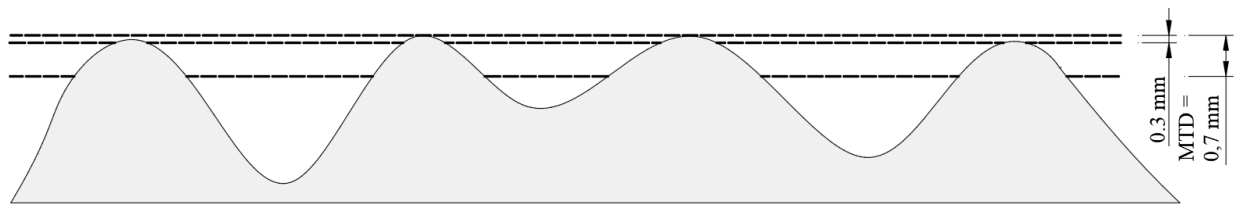


Figura 92 - Condições do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm

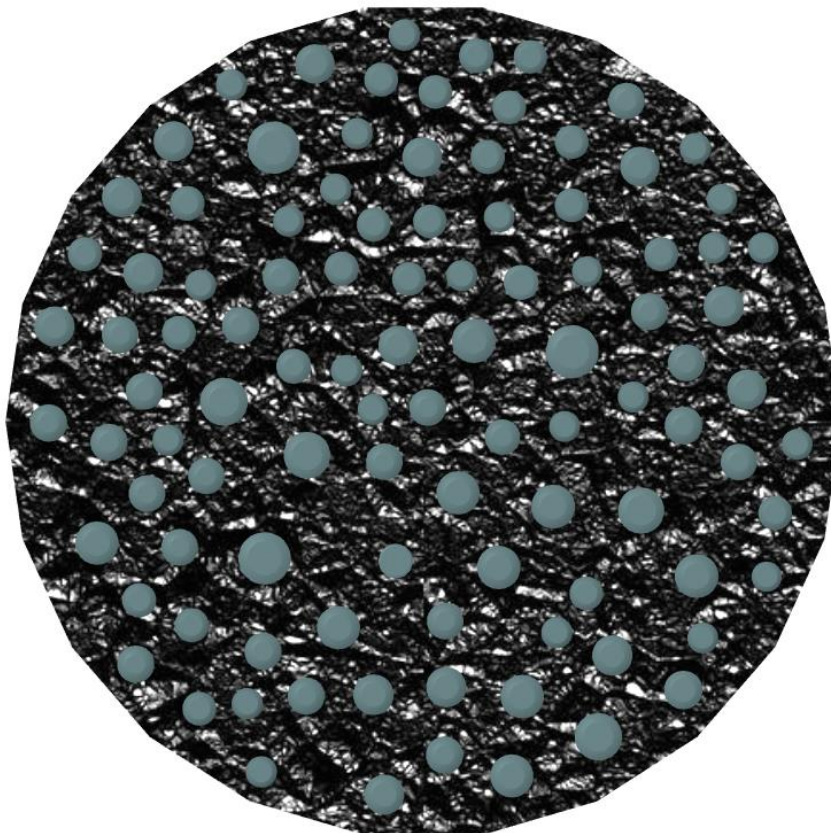


Figura 93 - Planta do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm

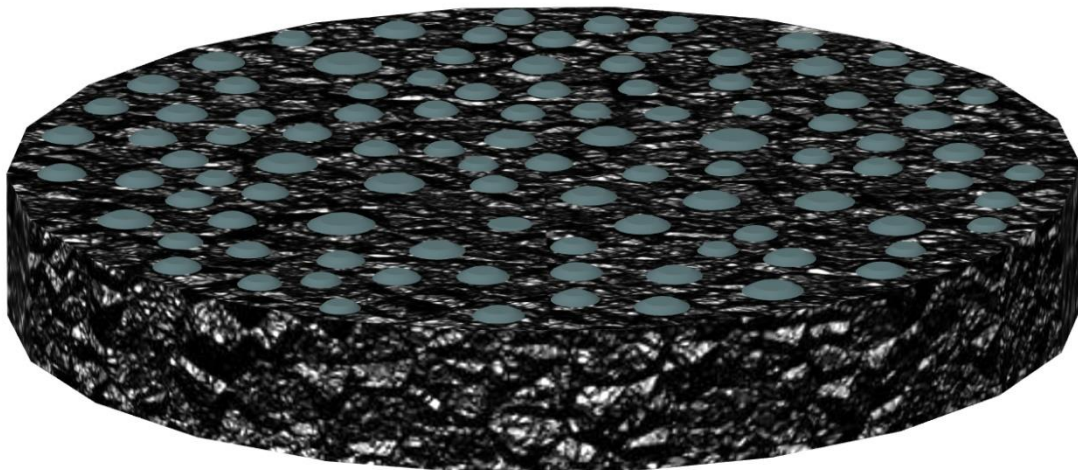


Figura 94 - Vista em perspetiva do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm

8.5.5. Modelo de uma mistura BBD com um desgaste de 0,3 mm e MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100%

Na Figura 95 é apresentado um modelo com desgaste a 0,3 mm do topo do agregado e com uma macrotextura de 0,7 mm, onde é colocado uma película de água a 100 % da macrotextura.

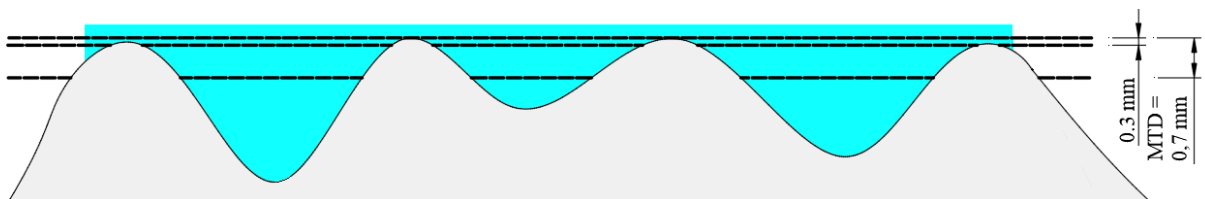


Figura 95 - Condições do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura

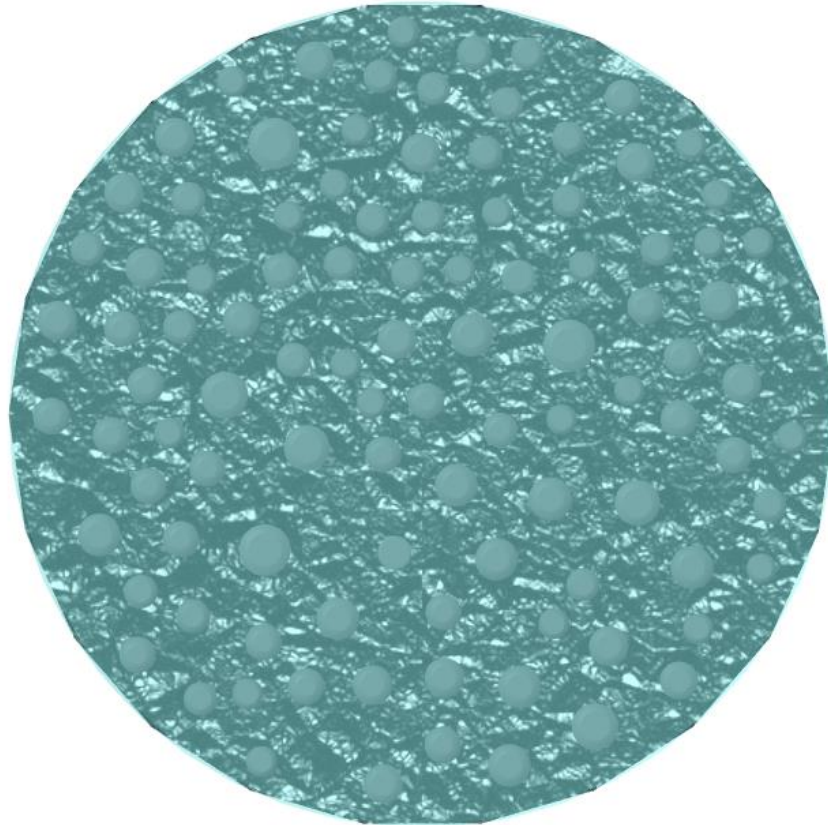


Figura 96 - Planta do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura

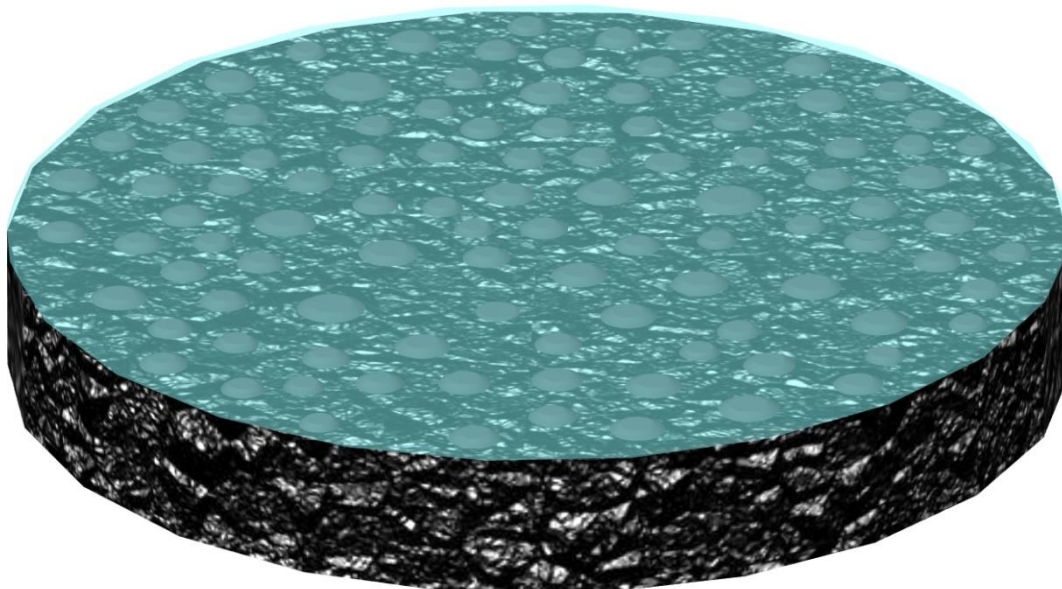


Figura 97 - Vista em perspectiva do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura



Figura 98 - Corte do modelo BBD com desgaste de 0,3 mm e com MTD = 0,7 mm e uma película de água a 100% da macrotextura

Capítulo 9

Conclusões e Trabalhos Futuros

9. Conclusões e Trabalhos futuros

Neste capítulo, apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido e ainda algumas propostas para trabalhos futuros que permitam dar continuidade a este estudo e melhorar esta metodologia.

9.1 Conclusões principais

Um dos objetivos desta dissertação consistia no desenvolvimento de uma modelação de base analítica de misturas betuminosas para camadas de desgaste que conseguisse modelar a superfície do pavimento para computacionalmente permitir a simulação da interação pneu-pavimento em função das características superficiais da camada de desgaste.

Foi realizado, assim como o proposto inicialmente, a modelação de diferentes tipos de pavimentos com misturas betuminosas de características diferentes. Optou-se por criar modelos de misturas de betão betuminoso denso, micro-betão betuminoso rugoso e betão betuminoso drenante, pois assim é possível obter uma metodologia mais abrangente. Estes modelos permitem analisar as camadas de desgaste que resultam das diferentes de misturas betuminosas e definir parâmetros relevantes da interação do pneu com a superfície do pavimento.

O modelo permite ainda estudar e analisar o comportamento da camada de desgaste para diferentes estados de conservação do pavimento. Pois é possível através da modelação da micro e macrotextura simular o desgaste de forma da camada de superficial analiticamente sem ser necessário recorrer a sua produção em laboratório. Também é possível recriar diferentes condições de utilização, isto é, simular pavimentos onde existe a presença de água e desta forma analisar o comportamento o pneu nesta situação.

O estudo específico de pavimento e do pneu, juntamente com as interações entre si, de forma preventiva e analítica são fundamentais na ação de combate aos acidentes, visto que não é necessário ocorrer a uma fatalidade para gerar as informações que irão ser utilizadas para otimização das características funcionais da camada de desgaste.

Foi possível nesta dissertação, demonstrar que é possível modelar protótipos de diferentes misturas betuminosas que irão servir de base para estudar a relação pneu-pavimento, com as propriedades superficiais de micro e macrotextura da camada de desgaste.

9.2. Propostas futuras

A partir dos modelos gerados é possível agora ajustar os parâmetros recorrendo a ensaios laboratoriais e de campo, onde será então necessário fabricar as misturas para que seja possível analisar as suas características superficiais ajustadas nos modelos respetivos.

Com o pleno conhecimento das misturas e seus efeitos, poder-se-á otimizar a composição para extrair a melhor combinação entre as proporções de agregados (de várias granulometrias) e betume, assim evitando os desgastes precoce, acidentes, hidroplanagem, resultando em uma eficiência superior e uma padronização que potencialize as qualidades de cada tipo de pavimento e mitigue as falhas inevitáveis do próprio material.

Seria ainda interessante usar este modelo de forma integrada num dispositivo eletrónico para que pudesse ser utilizado como equipamento de segurança ativa dos veículos autónomos. Este sistema iria avaliar instantaneamente a micro e macrotextura do pavimento para que o veículo conseguisse usar essa informação para adquirir em tempo real uma ideia das características superficiais da camada de desgaste e assim obter curvas de atrito do pavimento para conseguir ajustar o sistema de ABS para determinar a distância de travagem necessária para parar o veículo de forma segura.

Capítulo 10

Referências bibliográficas

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ascenso, S. (2011). *Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários - Avaliação das características Superficiais* (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.
- Branco, F., Ferreira, P., & Picado-santos, L. (2016). *Pavimentos Rodoviários* (Almedina (ed.); 5^o Edição).
- Couchinho, R. (2011). *Medição do coeficiente de atrito da superfície de pavimentos* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia Lisboa.
- Do, M.-T., Cerezo, V., Beautru, Y., & Kane, M. (2013). Modeling of the connection road surface microtexture/water depth/friction. *Wear*, 302, 1426–1435.
- Duarte, J. (2011). *Avaliação do Coeficiente de Atrito em Aeroportos Portugueses: O caso do aeroporto de Lisboa* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- Francisco, V. (2009). *A drenagem superficial e o seu impacto funcional e estrutural na vida dos pavimentos rodoviários* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Universidade do Porto.
- Hamersma, H. A., & Els, P. S. (2014). Improving the braking performance of a vehicle with ABS and a semi-active suspension system on a rough road. *Journal of Terramechanics*, 56, 91–101.
- Kraemer, C., Pardillo, J., Rocci, S., Romana, M., Blanco, V., & Val, M. (2004). *Ingeniería de Carreteras (Vol. II)* (McGraw Hill).
- Menezes, M. (2008). *Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise da segurança do tráfego* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- PIARC/AIPCR (2003). Evaluation of Investigations into the Applications of the IFI. Routes/Roads, 2003; n^o 318 – II. Paris (citado em Menezes, 2008).
- Pereira, P. e Miranda, C. (1999). “Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários”. Universidade do Minho, Braga (citado em Menezes, 2008).
- Pereira, C., Soares, J., Pontes Filho, I., & Branco, V. (2012). Análise da aderência pneu-pavimento em pontos de ocorrência de acidentes. *Transportes*, 20(2), 65–74.
- Pimentel, C. (2013). *Formulação de misturas betuminosas a quente contribuição para um novo método de formulação* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia. Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias.
- Reis, N. (2009). *Análise Estrutural de Pavimentos Rodoviários - Aplicação a um*

- Pavimento Reforçado com Malha de Aço* (Dissertação de Mestrado). Instituto superior técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- Rodrigues Filho, O. S. (2006). *Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários. Estudo de caso do aeroporto internacional de São Paulo/Congonhas* (Dissertação de Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Silva, A. (2014). *Formulação de misturas betuminosas a quente: análise comparativa da aplicação de métodos empíricos e volumétricos* (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- Silva, J. (2008). *Aderência Pneu-Pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários* (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília.
- Silva, L. (2009). *Pavimentos Aeroportuários: Análise rígida e de soluções flexíveis* (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.
- Silvério, C. (2015). *Características superficiais de pavimentos betuminosos - consequências na interação veículo-pavimento* (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.
- Simões, D., Almeida-Costa, A., & Benta, A. (2017). Preventive maintenance of road pavement with microsurfacing—an economic and sustainable strategy. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(9), 670–68.
- Soares, A. (2011). *Análise da ocorrência de hidroplanagem num caso real* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Ciência e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.
- Tavares, A. I. F. (2013). *Mistura Betuminosa Drenante em vias urbanas : Desempenho e manutenção* (Dissertação de Mestrado). Universidade da Beira Interior.
- Tavares, R. (2016). *Fabrico, Controlo de Qualidade e Colocação de Mistura Betuminosa em Obra* (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Leiria.
- Wilson, D. (2006). *An Analysis of the Seasonal and Short-Term Variation of Road Pavement Skid Resistance* (Tese de Doutoramento). Universidade de Auckland, Nova Zelândia.
- Young, W., Sobhani, A., Lenné, M. G., & Sarvi, M. (2014). Simulation of safety: A review of the state of the art in road safety simulation modelling. *Accident Analysis & Prevention*, 66, 89–103.