



Gonçalo Montezuma Gomes

# O USO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO NA FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS

## THE USE OF THE GYRATORY COMPACTOR TO DESIGN BITUMINOUS MIXTURES

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e  
Vias de Comunicação, orientada pela Professora Doutora Arminda Maria Marques Almeida

Coimbra, 7 de Setembro de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Gonçalo Montezuma Gomes

# **O USO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO NA FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS**

## **THE USE OF THE GYRATORY COMPACTOR TO DESIGN BITUMINOUS MIXTURES**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, orientada pela Professora Doutora Arminda Maria Marques Almeida

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer  
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões  
que possa conter.

Coimbra, 7 de Setembro de 2018

## AGRADECIMENTOS

A concretização desta dissertação apenas foi possível graças ao apoio de um grupo dedicado de amigos. A todos gostaria de expressar a minha gratidão. De entre eles, e pelo seu empenho e dedicação, gostaria de salientar:

A Professora Doutora Arminda Maria Marques Almeida, pelo acompanhamento, orientação, disponibilidade crítica, dedicação e sugestões pertinentes que em muito contribuíram para a concretização deste trabalho;

Ao técnico de laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil de Coimbra, Celestino Marques, por toda a disponibilidade prestada;

Aos amigos, César Abreu e Luís Araújo, pela ajuda e esclarecimentos disponibilizados;

À empresa “Prioridade” pela disponibilidade e fornecimento do material utilizado nesta dissertação;

À minha família, pelo apoio, carinho, compreensão e motivação demonstrada ao longo do meu percurso académico;

Aos meus amigos e colegas de curso pelo apoio incondicional, paciência e compreensão;

Aos meus pais e irmão, pelo grande apoio, carinho e muita dedicação demonstrados ao longo do meu percurso e em muito especial, nesta última etapa.

A todos, um sincero Obrigado!

## RESUMO

A formulação de misturas betuminosas em Portugal baseia-se no método de Marshall, um método empírico com uma grande experiência de utilização. Este método usa o compactador de impacto no fabrico dos provetes, onde a mistura é compactada por impacto num molde cilíndrico através da queda de uma massa deslizante de uma altura fixa um determinado número de vezes, em cada topo do provete. O número de pancadas a aplicar é em função do volume de tráfego estimado, considerando-se correntemente 75 pancadas.

Como alternativa ao método de Marshall, surge a metodologia SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement System) que usa o compactador giratório no fabrico dos provetes. O compactador giratório permite analisar como evolui a compactação do provete com a energia aplicada. A energia de compactação é definida pelo valor do número de giros, do ângulo de compactação e da pressão de compressão aplicada no topo do provete (parâmetros de compactação).

Sendo o compactador giratório pouco usado em Portugal, ao contrário do que acontece noutros países, pretende-se com este trabalho contribuir para um melhor conhecimento do impacto dos parâmetros de compactação nas propriedades volumétricas e na trabalhabilidade da mistura.

Para tal, considerou-se uma mistura AC20 (MB) com duas percentagens de betume (4,5 e 5,0%) e fabricaram-se provetes recorrendo ao compactador de impacto (50 e 75 pancadas) e ao compactador giratório (três ângulos e três pressões).

De modo a avaliar o impacto dos parâmetros de compactação, considerados no compactador giratório, avaliou-se a trabalhabilidade da mistura segundo diferentes procedimentos e realizou-se uma análise estatística (ANOVA), tendo-se concluído que apenas variações significativas nos parâmetros de compactação afetam a trabalhabilidade da mistura.

**Palavras-Chave:** mistura betuminosa, formulação de misturas betuminosas, compactador giratório, ângulo interno, pressão de compressão, trabalhabilidade, ANOVA

## ABSTRACT

The design of bituminous mixtures in Portugal is based on the Marshall method, an empirical method for which there is great experience of use. This method uses the impact compactor in the preparation of specimens, where the mixture is impact compacted in a cylindrical mold by dropping a sliding mass of a fixed height a certain number of blows, on each top of the specimen. The number of bows to be applied is a function of the estimated traffic volume, with 75 blows currently being considered.

As an alternative to the Marshall method, the SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement System) methodology is used, which uses the gyratory compactor in the preparation of specimens. The gyratory compactor allows to evaluate how the compaction of the specimen with the applied energy evolves. The compaction energy is defined by the number of cycles, the gyratory angle and the compression pressure applied to the top of the specimen (compaction parameters).

As the gyratory compactor is little used in Portugal, unlike in other countries, this work intends to contribute to a better understanding of the impact of compacting parameters on the volumetric properties and the workability of the mixture.

For this, an AC20 (MB) mixture with two percentages of bitumen (4.5 and 5.0%) was considered and specimens were prepared using the impact compactor (50 and 75 blows) and the gyratory compactor (three angles and three pressures).

In order to evaluate the impact of the compaction parameters considered in the gyratory compactor, the workability of the mixture was evaluated according to different procedures and a statistical analysis (ANOVA) was carried out, and it was concluded that only significant variations in the compaction parameters affect the workability of the misture.

**Keywords:** bituminous mixture, bituminous mixture design, gyratory compactor, gyratory angle, compression pressure, workability, ANOVA

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Objetivos e metodologia .....	1
1.3	Estrutura do trabalho.....	2
2.	FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS .....	3
2.1	Considerações iniciais.....	3
2.2	Pavimento rodoviário.....	3
2.3	Propriedades das misturas betuminosas.....	5
2.4	Composição das misturas betuminosas.....	6
2.5	Metodologias de formulação .....	9
2.5.1	Introdução.....	9
2.5.2	Metodologia de Formulação usada em Portugal .....	11
2.5.3	Metodologia SUPERPAVE.....	13
2.5.4	Metodologia SUPERPAVE vs outras metodologias.....	15
2.6	Compactador giratório .....	16
2.7	Trabalhabilidade .....	18
3.	CASO DE ESTUDO .....	26
3.1	Considerações iniciais.....	26
3.2	Caracterização dos materiais .....	26
3.2.1	Agregados.....	26
3.2.2	Betume.....	28
3.2.3	Mistura.....	32
3.3	Compactador giratório .....	34
3.4	Fabrico dos provetes .....	36
3.5	Porosidade, VMA e VFB.....	39
3.6	Ensaio de compressão Marshall.....	46
3.7	Trabalhabilidade .....	48
3.8	Considerações finais .....	58
4.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	59
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
6.	ANEXOS.....	65
	Anexo A – Ficha de produto .....	65
	Anexo B – Dados dos provetes compactados .....	69



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário do tipo flexível (Ana Francisco, 2012) .....	4
Figura 2.2 - Composição de uma amostra de mistura betuminosa compactada (Branco et al., 2011).....	6
Figura 2.3 - Equipamentos do laboratório de Pavimentos Rodoviários da UC.....	12
Figura 2.4 - Parâmetros de compactação (Gardete, 2016) .....	18
Figura 2.5 - Representação dos índices k e v(1) por uma equação de ajuste(EN 12697-10)...	19
Figura 2.6- Representação (“de uma parte”) dos índices energéticos, CEI e WEI, na curva de compactação. ....	20
Figura 3.1 – NP EN 933-1) – a) uso do espartelador b) material na estufa juntamente com a sílica.....	27
Figura 3.2 - NP EN 933-1 – a) coluna de peneiros e respetivo agitador mecânico b) lavagem dos agregados .....	27
Figura 3.3 - Curvas granulométricas dos agregados.....	28
Figura 3.4 - NP EN 1426: a) preparação do provete no banho, b) tina, provete e agulha.....	29
Figura 3.5 - NP EN 1426: a) Penetrómetro , b) Provete no fim do ensaio .....	30
Figura 3.6 - NP EN 1427: a) Excesso de betume a ser removido do anel, b) Medição da altura de água necessária. ....	31
Figura 3.7 - NP EN 1427: Fim de um ensaio realizado.....	31
Figura 3.8 - Formulação da mistura dos agregados.....	33
Figura 3.9 - <i>ILS (Invelop Load Simulator)</i> .....	34
Figura 3.10 - Simulador da mistura para calibrar a altura .....	35
Figura 3.11 - Esquema dos ensaios realizados e respetivas variações .....	36
Figura 3.12 - a) misturadora mecânica do laboratório de pavimentos da UC b) mistura na estufa antes da compactação .....	37
Figura 3.13 - Moldes do compactador de impacto. ....	38
Figura 3.14 - a) compactador giratório e um provete a arrefecer após a compactação b) provetes compactados com o compactador giratório. ....	39
Figura 3.15 - a) temperatura medida durante um ensaio b) balança para o cálculo da baridade .....	40
Figura 3.16 - a) mistura desagregada, b) picnómetro de vácuo.....	40
Figura 3.17 - Porosidades para ambas as misturas, 4,5% e 5,0% de betume. ....	42
Figura 3.18 - VMA para ambas as misturas, 4,5% e 5,0% de betume. ....	43
Figura 3.19 - VFB para ambas as misturas, 4,5% e 5,0% de betume.....	43
Figura 3.20- Evolução da porosidade, nas misturas de 4,5% e de 5%, compactada com o compactador giratório.....	44



Figura 3.21 - Evolução do VMA, nas mistura de 4,5% e 5,0%, compactada no compactador giratório. ....	45
Figura 3.22 - Evolução do VFB, na mistura de 4,5% e 5,0%, compactada no compactador giratório. ....	45
Figura 3.23 - Evolução da porosidade na mistura de 4,5% e 5,0% de betume, com uma pressão de 600 kPa e com o ângulo correspondente a 35 scale.....	46
Figura 3.24- Estabilidade Marshall. ....	47
Figura 3.25- Deformação Marshall .....	47
Figura 3.26 - Resultados do parâmetro $k$ para as misturas de 4,5% e 5,0%, variando a pressão e o ângulo de giro. ....	49
Figura 3.27 - Resultados do parâmetro $v(1)$ para as misturas de 4,5% e 5,0%, variando as pressões e os ângulos.....	49
Figura 3.28 - Resultados do parâmetro $k \times AV$ para as misturas de 4,5% e 5,0%, variando as pressões e ângulos. ....	50
Figura 3.29 - Resultados do parâmetro WEI para as misturas de 4,5% e 5,0%, variando as pressões e ângulos. ....	51
Figura 3.30 - Resultados do parâmetro CEI para as misturas de 4,5% e 5,0%, variando as pressões e ângulos. ....	51
Figura 3.31 – Gráficos <i>box plot</i> dos parâmetros de trabalhabilidade por categorias.....	53
Figura 3.32 - Visualização gráfica dos testes de comparações múltiplas para os parâmetros de trabalhabilidade $k$ (inclinação da curva de evolução da porosidade) e $v(1)$ (porosidade da mistura a 1 giro).....	54
Figura 3.33 - Visualização gráfica dos testes de comparações múltiplas para os parâmetros de trabalhabilidade CEI (Compaction Energy Index) e WEI (Workability Energy Index).....	55
Figura 3.34 - Visualização gráfica dos testes de comparações múltiplas para o parâmetro de trabalhabilidade $k \times av$ (produto da inclinação da curva de evolução da porosidade pela porosidade a 120 giros). ....	56

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Função das camadas e da fundação de um pavimento rodoviário (Ana Francisco, 2012).....	4
Quadro 2.2 – Variáveis que afetam as propriedades das misturas betuminosas (baseado em Branco et al, 2011; Fonseca, 2011). .....	5
Quadro 2.3 – Características dos níveis de formulação (McDaniel et al., 2011) .....	14
Quadro 2.4 - Propriedades volumétricas para misturas SUPERPAVE (Gardete,2016).....	15
Quadro 3.1 - Granulometria dos agregados.....	28
Quadro 3.2 - Condições de ensaio (NP EN 1426).....	29
Quadro 3.3 – Resultados dos ensaios de penetração realizados.....	30
Quadro 3.4 - Propriedades e exigências de conformidade (Branco et al., 2011) .....	32
Quadro 3.5 – Formulação da mistura dos agregados .....	33
Quadro 3.6 - Resultados da calibração com o ILS .....	35
Quadro 3.7 -Resultados dos testes de comparações múltiplas .....	57

## ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A,  $v(1)$  – Porosidade para o 1º giro  
AC – Asphalt Concrete  
ANOVA – Analysis of variance  
b – Inclinação da curva de compactação  
B – Percentagem de betume (relativamente à massa total da mistura)  
BMT – Baridade Máxima Teórica  
CC – Compactability index  
CEI – Compaction Energy Index  
CS – Compaction Slope  
CG – Compactador giratório  
d – Diâmetro do molde  
DEI - Densification Energy Index  
EN – European standard  
EUA – Estados Unidos da América  
FHWA – Federal Highway Administration  
GTM – Gyratory Test Machine  
H, h – altura  
ILS - Invelop Load Simulator  
IP – Infraestruturas de Portugal, SA  
k - Inclinação da curva de evolução da porosidade  
 $k \times AV$  - Inclinação da curva de compactação multiplicada pela porosidade no primeiro giro  
M, m – massa  
MB – Macadame Betuminoso  
MATLAB - MATrix LABoratory  
MSI - Mix Stability Index  
N – Número de giros  
N des - Número de giros utilizado para a formulação  
N ini - Número de giros utilizado para simular a compactação em obra  
ng – Número de giros  
 $N_i$  – giro número i  
 $N_{max}$  - Número de giros utilizado para simular um nível de compactação extremo  
NP – Norma Portuguesa  
P – Pressão  
R – Raio do molde  
SGC – SUPERPAVE Gyratory Compactor  
SHRP – Strategic Highway Research Program

SSD – Provede saturado com a superfície seca (Saturated Surface Dry)

SUPERPAVE – Superior Performing Asphalt Pavements

UC – Universidade de Coimbra

$v(ng)$  – Porosidade após  $ng$  giros

$v(x)$  – Porosidade no giro  $x$

$V_a$  – Volume de material agregado

$V_b$  – Volume de betume

VFB – Vazios preenchidos por betume

$V_m$  – Porosidade da mistura em percentagem

VMA – Vazios no esqueleto do agregado

$V_p$  – Volume do picnómetro cheio de água até a uma marca de referência

$V_t$  – Volume total

$V_v$  – Volume de vazios

$w$  – Frequência angular

WEI - Workability Energy Index

WI – Workability Index

$\alpha$  – Ângulo interno

$\rho$  – Baridade do provede

$\rho_B$  – Massa volúmica do betume

$\rho_{mv}$  – Baridade máxima teórica

$\rho_w$  – Massa volúmica da água à temperatura do ensaio

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Enquadramento**

Em Portugal, a rede rodoviária nacional é composta por 17.874 km (IP, 2018) de extensão e a maioria dos pavimentos é do tipo flexível. Os pavimentos flexíveis são compostos por várias camadas em que algumas delas são constituídas por misturas betuminosas.

Estas misturas betuminosas são constituídas por agregado e betume e são formuladas usando métodos empíricos, mais propriamente o método de Marshall. Este método apresenta algumas vantagens, das quais se destaca a facilidade de aplicação e a vasta experiência de utilização, mas também é detentor de algumas desvantagens, especialmente a não reprodução da compactação das misturas betuminosas em obra e durante o seu período de vida útil. Como alternativa à compactação por impacto, usada no método de Marshall, surge o compactador giratório usado da metodologia SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement System), que permite avaliar a evolução da compactação do provete com a energia aplicada. A energia de compactação é definida pelo valor do número de giros, do ângulo de compactação e da pressão de compressão aplicada no topo do provete (parâmetros de compactação). Contudo, não existe grande experiência em Portugal no uso do compactador giratório.

O presente trabalho surge dessa necessidade, tendo como objetivo principal a avaliação do impacto dos parâmetros de compactação (ângulo e pressão) nas características volumétricas e na trabalhabilidade da mistura betuminosa.

### **1.2 Objetivos e metodologia**

Como referido anteriormente, este trabalho visa avaliar o impacto de parâmetros de compactação a partir de uma análise de sensibilidade, usando para tal duas misturas betuminosas, um AC 20 (MB – Macadame Betuminoso) com duas percentagens de betume (4,5 e 5,0%), três ângulos de compactação (20, 35 e 50 de scale) e três pressões de compressão (500, 600 e 700 kPa).

São analisadas as curvas de compactação a partir da evolução das características volumétricas e de parâmetros de trabalhabilidade. Em paralelo, as mesmas misturas são compactadas pelo compactador de impacto usando duas energias de compactação, 50 e 75 pancadas em cada topo do provete.

De forma de avaliar a significância do impacto dos parâmetros de compactação na trabalhabilidade da mistura é realizada uma análise estatística que engloba uma análise de variância (ANOVA) e testes de comparações múltiplas de médias, usando para tal a ferramenta MATLAB®.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Esta dissertação é composta por 4 capítulos, referencias bibliográficas e anexos, com o intuito de apresentar, da forma mais coerente, o trabalho desenvolvido.

No capítulo 1 faz-se o enquadramento, apresentam-se os objectivos e repectiva metodologia usada neste trabalho.

No capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica, incluindo a composição de um pavimento rodoviário e das misturas betuminosas, bem com as suas propriedades. Descreve-se as metodologias existentes e com mais pormenor o método usado em Portugal. Por último ainda se especifica com algum detalhe o aparelho giratório usado, bem como alguns parâmetros usados na trabalhabilidade das misturas.

No capítulo 3, apresenta-se a parte prática, os resultados obtidos e algumas conclusões. Começa-se por verificar o material dado para se definir a curva da mistura, partindo para a reprodução dos provetes em ambos os equipamentos com uma breve conclusão dos resultados. Ainda neste capítulo, avalia-se a trabalhabilidade das misturas e a influência de parâmetros usando uma análise estatística.

No último capítulo, apresentam-se as conclusões obtidas com esta dissertação, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2. FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS

### 2.1 Considerações iniciais

Este capítulo visa enquadrar e rever o objeto em estudo, isto é, as misturas betuminosas, mais propriamente a sua formulação com recurso ao compactador giratório. Assim sendo, começar-se-á por fazer uma breve introdução à constituição de um pavimento rodoviário. De seguida, apresentam-se as principais propriedades, a composição das misturas betuminosas e métodos de formulação. Será dado um maior ênfase ao compactador giratório e à trabalhabilidade das misturas betuminosas, uma vez que se trata de uma propriedade fundamental das misturas betuminosas facilmente avaliada a partir das curvas de compactação obtidas no compactador giratório.

### 2.2 Pavimento rodoviário

Um pavimento rodoviário tem o objetivo de assegurar conforto e comodidade aos seus utentes durante um determinado período de vida, tendo em conta várias factores, como a ação do tráfego e do clima. Este objetivo é obtido através das camadas do pavimento, que apresentam um papel estrutural e/ou funcional. Além disso, os pavimentos podem ser flexíveis ou rígidos, dependendo do tipo de ligante que se usar, dando origem a misturas betuminosas ou misturas hidráulicas, respetivamente. A grande diferença entre estes é a distribuição de tensões, que é maior no solo de fundação em pavimentos flexíveis. Os pavimentos rígidos apresentam uma menor concentração de tensões no solo de fundação por estas tensões se dissiparem nas camadas anteriores (Ferreira e Almeida, 2015).

Uma vez que esta tese incide sobre pavimentos rodoviários do tipo flexível, apresenta-se na Figura 2.1 um esquema que ilustra as camadas que compõem a estrutura deste tipo de pavimento.

Pela análise da Figura 2.1, infere-se que a camada de desgaste, de ligação e de base são as camadas betuminosas que são constituídas por agregados e betume, em que a camada de base assume o papel mais importante a nível estrutural. As camadas subjacentes, base e/ou sub-base granular, são camadas não ligadas que assentam no solo de fundação (formado pelo solo natural).

Na Figura 2.1, ainda está referenciado um dreno que serve para escoar a água que drena para as camadas granulares e de fundação para que estas não tenham problemas a nível estrutural, visto que a água é um dos maiores inimigos do pavimento.

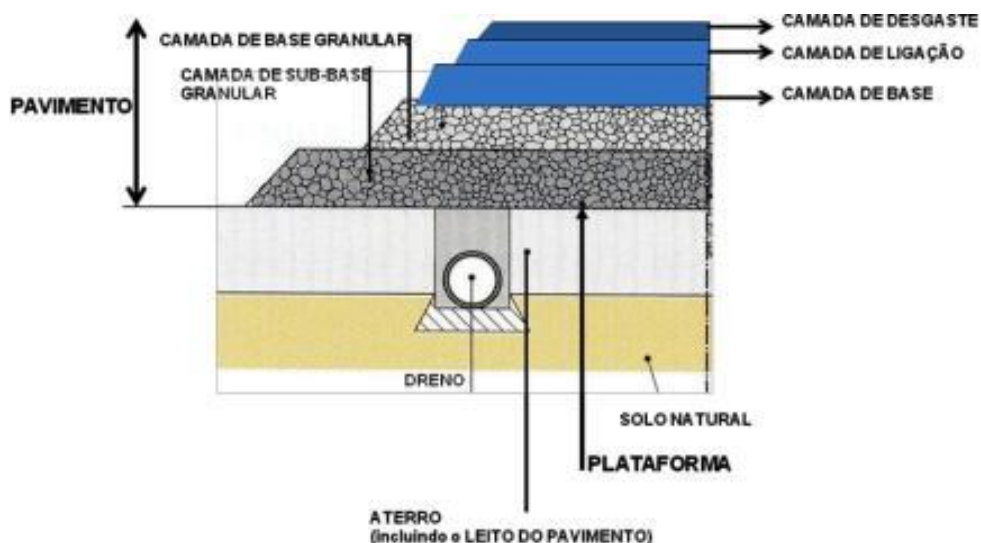


Figura 2.1- Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário do tipo flexível (Francisco, 2012)

Na Figura 2.1, ainda está referenciado um drenó que serve para escoar a água que drena para as camadas granulares e de fundação para que estas não tenham problemas a nível estrutural, visto que a água é um dos maiores inimigos do pavimento.

No Quadro 2.1, apresentam-se as funções das camadas referidas:

Quadro 2.1 - Função das camadas e da fundação de um pavimento rodoviário (Francisco, 2012)

Camadas do Pavimento		Função
Camadas Betuminosas	Desgaste	- Adequada circulação do tráfego com conforto e segurança - Drenagem ou impermeabilização - Distribuição das tensões induzidas pelo tráfego
	Ligação	- Fazer a ligação entre as camadas
	Regularização	- Regularizar a superfície de camadas já existentes
Camadas Granulares	Base Betuminosa	- Camada estrutural
	Base	- Camada estrutural
	Sub-base	- Proteger durante uma fase construtiva as camadas inferiores - Proteger a base da subida de água capilar - Drenagem interna do pavimento - Camada estrutural - Resistência à erosão



Quadro 2.1 - Função das camadas e da fundação de um pavimento rodoviário (Francisco, 2012) - Continuação

Camadas do Pavimento		Função
Solo de Fundação	Leito do Pavimento	- Evitar deformação do solo - Homogeneidade das características mecânicas da fundação - Plataforma construtiva - Possibilidade de compactação das camadas sobrejacentes em adequadas condições
	Terreno da Fundação	- Suporte do pavimento

### 2.3 Propriedades das misturas betuminosas

As propriedades das misturas betuminosas dependem (embora não somente) da percentagem ótima de betume, que resulta do estudo de formulação da mistura. Apesar desta percentagem não condicionar todas as propriedades da mistura, irá exercer uma grande influência no seu comportamento. Em todas as camadas betuminosas independentemente do seu tipo, devem ser garantidas algumas características gerais como a economia, a durabilidade e a facilidade de execução. No Quadro 2.2 são apresentadas as principais propriedades de uma mistura, definindo e identificando as variáveis que as afetam.

Quadro 2.2 – Variáveis que afetam as propriedades das misturas betuminosas (baseado em Branco et al., 2011; Fonseca, 2011).

Propriedades	Definição	Variáveis que afetam as propriedades
Flexibilidade	Capacidade da mistura se moldar aos assentamentos e deformações das camadas inferiores sem fendilhar.	- Granulometria - Percentagem de betume - Rigidez do betume
Estabilidade	Consiste em obter uma mistura com a capacidade adequada para resistir às deformações produzidas pelas cargas a que fica sujeita em serviço.	- Textura da superfície do agregado - Granulometria - Percentagem de betume - Rigidez do betume
Durabilidade	Capacidade de resistir à sua desagregação (envelhecimento do betume, desintegração do agregado) devido às ações climáticas e às ações do tráfego.	- Granulometria - Percentagem de betume - Grau de compactação - Sensibilidade à água

Quadro 2.2 – Variáveis que afetam as propriedades das misturas betuminosas (baseado em Branco et al., 2011; Fonseca, 2011).- Continuação

Propriedades	Definição	Variáveis que afetam as propriedades
Resistência à fadiga	Capacidade da mistura em resistir a esforços das cargas de tráfego sem ocorrência de fendilhamento.	- Granulometria - Teor em betume - Rigidez do betume - Grau de compactação - Temperatura da mistura
Aderência	Aptidão da mistura para proporcionar um adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado.	- Granulometria - Tipo e textura do agregado - Resistência do agregado ao polimento
Impermeabilidade	Capacidade desta oferecer uma boa resistência à passagem de água e do ar.	- Quantidade de vazios - Granulometria - Grau de compactação - Percentagem de betume
Trabalhabilidade	Facilidade na compactação e colocação de uma mistura betuminosa.	- Equipamentos - Granulometria - Percentagem de betume

## 2.4 Composição das misturas betuminosas

As misturas betuminosas são constituídas por agregados (80 a 85%), betume (3 a 7%) e ar, cujas propriedades, referidas na secção 2.2, dependem das proporções de cada um deles. Algumas dessas propriedades podem ser avaliadas através de várias características, permitindo desta forma prever o comportamento da mistura (Branco et al., 2011). De seguida apresenta-se uma amostra da composição de uma mistura betuminosa, Figura 2.2, e algumas características.

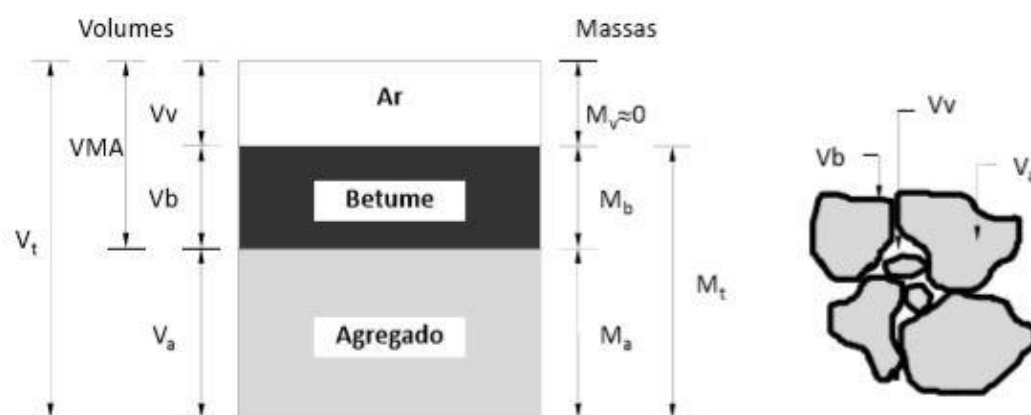


Figura 2.2 - Composição de uma amostra de mistura betuminosa compactada (Branco et al., 2011)

Onde,

- Ma – Massa de material agregado (g)
- Mb – Massa de betume (g)
- Mv – Massa dos vazios (*desprezável*)
- Mt – Massa total (g)
- Va – Volume de material agregado (cm<sup>3</sup>)
- Vb – Volume de betume (cm<sup>3</sup>)
- Vv – Volume de vazios (cm<sup>3</sup>)
- VMA – Volume de vazios no esqueleto de agregado (cm<sup>3</sup>)
- Vt – Volume total (cm<sup>3</sup>)

De seguida apresentam-se as expressões para a determinação da baridade, da baridade máxima teórica, da porosidade, do VMA e do VFB (vazios preenchidos com betume).

a) Baridade.

É determinada pela divisão da massa pelo seu volume e pode ser calculada através da seguinte expressão (2.1), de acordo com a norma EN 12697-6.

$$\rho = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (2.1)$$

Onde,

- $\rho$  – baridade do provete (kg/m<sup>3</sup>)
- $m_1$  – massa do provete a seco (kg)
- $m_2$  – massa do provete em água (kg)
- $m_3$  – massa do provete saturado (kg)
- $\rho_w$  – massa volumica da água à temperatura do ensaio (kg/m<sup>3</sup>)

b) Baridade máxima teórica

Esta é determinada a partir do conhecimento do volume da mistura betuminosa sem vazios, seguindo o procedimento descrito na norma EN 12697-5 e utilizando a expressão (2.2).

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 * V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}} \quad (2.2)$$

Onde,

$\rho_{mv}$  – baridade máxima teórica ( $kg/m^3$ )

$m_1$  – massa do picnómetro mais tampa (g)

$m_2$  – massa do picnómetro mais amostra e mais tampa (g)

$m_3$  – massa do picnómetro mais amostra, mais tampa e mais água (g)

$V_p$  – volume do picnómetro cheio de água até a uma marca de referência ( $m^3$ )

$\rho_w$  – massa volúmica da água à temperatura do ensaio ( $kg/m^3$ )

c) Porosidade

Este índice é calculado com base nos resultados obtidos das expressões (2.1) e (2.2), baridade e baridade máxima teórica, respetivamente. A norma EN 12697-8 indica que pode ser calculado através expressão (2.3).

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho}{\rho_{mv}} \times 100 \quad (2.3)$$

Onde,

$V_m$  – porosidade da mistura em percentagem (%)

$\rho_{mv}$  – baridade máxima teórica da mistura ( $kg/m^3$ )

$\rho$  – baridade do provete ( $kg/m^3$ )

d) Volume de vazios no esqueleto do agregado.

Este representa o volume, em percentagem, ocupado pelo ar e pelo betume. Logo representa o volume que não é ocupado por agregado. No entanto, existe uma percentagem de betume que é absorvida pelo agregado que não é contabilizado na expressão. A norma EN 12697-8 indica que pode ser calculado através da expressão (2.4).

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho}{\rho_B} \quad (2.4)$$

Onde,

$VMA$  – volume de vazios no esqueleto do agregado (%)

$V_m$  – porosidade (%)

$B$  – percentagem de betume na mistura (%)

$\rho$  – baridade do provete ( $kg/m^3$ )

$\rho_B$  – massa volúmica do betume ( $kg/m^3$ )

e) Volume de vazios preenchidos por betume.

Este representa a parte ocupada pelo betume no volume de vazios do esqueleto do agregado, VMA. A norma EN 12697-8 mostra que este índice pode ser calculado pela expressão (2.5).

$$VFB = \frac{B \times \frac{\rho}{\rho_B}}{VMA} \times 100 \quad (2.5)$$

Onde,

*VFB* – percentagem do volume de vazios no esqueleto do agregado preenchido por betume (%)

*B* – percentagem de betume na mistura (%)

$\rho$  – baridade do provete ( $kg/m^3$ )

$\rho_B$  – massa volúmica do betume ( $kg/m^3$ )

*VMA* – volume de vazios no esqueleto do agregado (%)

## 2.5 Metodologias de formulação

### 2.5.1 Introdução

Com o incremento do tráfego ao longo dos anos, foi sendo necessário melhorar o desempenho dos pavimentos. Tendo em conta diversos fatores como o tráfego, as condições climáticas e as condições estruturais, pode-se melhorar o comportamento das misturas betuminosas através de métodos de formulação, de modo a determinar, com maior precisão, as quantidades de cada componente de uma mistura betuminosa.

Na literatura científica, podem-se encontrar diversos métodos de formulação para uma mistura betuminosa (Gardete, 2016, Pimentel, 2013; Ferreira e Almeida, 2015):

- Por especificação ou “por receita”;
- Empíricos;
- Analíticos;
- Volumétricos;
- Relacionados com o desempenho;
- Baseados no desempenho;
- Mistos.

Os **métodos “por receita”** são utilizados quando existem muita experiência na sua utilização, podendo afirmar que misturas betuminosas já utilizadas em obra, sujeitas a um dado tráfego e clima, apresentam igual comportamento. A mistura é definida por uma dada especificação que define: a granulometria do agregado, o tipo e quantidade de betume, a espessura da camada, colocação e compactação em obra. Contudo, este método apresenta algumas desvantagens, como o não permitir inovação ou adaptação nos materiais que não sejam os definidos.

Os **métodos empíricos** são os mais utilizados. Estes métodos de formulação têm procedimentos simples e um conhecimento muito alargado da sua utilização o que constitui uma grande vantagem. No entanto, apresentam a desvantagem de não simularem de uma forma correta o comportamento dos materiais e de se apresentarem desadequados perante novos materiais. Um dos métodos mais conhecidos e com bastante divulgação em vários países, inclusive Portugal, é o método de Marshall. Este baseia-se em determinar a percentagem ótima de betume através de ensaios empíricos.

Os **métodos analíticos** utilizam expressões matemáticas que permitem obter a percentagem ótima de betume. Estes cálculos baseiam-se numa estimativa das propriedades volumétricas das misturas. São métodos que não necessitam de realizar provetes, no entanto é exigido por algumas administrações rodoviárias que sejam feitos ensaios laboratoriais, para estes terem maior credibilidade. Alguns desses métodos mais complexos, necessitam de *softwares* específicos para a obtenção dos resultados.

Os **métodos volumétricos** são métodos que avaliam as diferentes componentes da mistura (agregados, betume e vazios) em termos volumétricos. É um método que realiza provetes em laboratório e que tenta aproximar-se da compactação obtida em obra, com a ajuda do compactador giratório, um dos procedimentos mais utilizado. Não é necessário determinar as características mecânicas aos provetes compactados para determinar a percentagem ótima de betume. Um dos métodos conhecidos e desenvolvidos nesta metodologia é a do SUPERPAVE. No entanto, esta indica que para situações mais exigentes se realizem ensaios de desempenho. Estes métodos têm a vantagem de serem de simples aplicação.

Os **métodos de formulação relacionados com o desempenho** das misturas betuminosas, visam ser um acrescento aos métodos de formulação anteriormente referidos, com o intuito de os melhorar. Este melhoramento faz-se com a realização de ensaios que determinam propriedades das misturas que se pensa estar relacionadas com o seu desempenho em serviço. Numa fase inicial, rege-se por critérios volumétricos e por métodos de formulação já mencionados. Este método tem a vantagem de permitir a comparação do desempenho de misturas sem recurso à determinação das suas propriedades mecânicas.

Os **métodos de formulação baseados no desempenho** são métodos que procuram determinar o desempenho das misturas betuminosas para ser possível prever o seu comportamento em serviço. Tratam-se de métodos que dão mais liberdade na formulação da mistura, mas que implicam a determinação do desempenho, sendo adequados no estudo de novas misturas. No entanto, os ensaios que se realizam (p.e. ensaio para a determinação da rigidez da mistura e da mistura), juntamente com a sua análise por vezes complexa, são bastante dispendiosos o que dificulta o uso desta metodologia.

Por último, os **métodos mistos** combinam métodos anteriormente referidos. Em Portugal, atualmente, é este o método usado. A formulação das misturas betuminosas é feita com base no método de Marshall, método empírico, acrescentando com ensaios de sensibilidade à água e de resistência à deformação permanente (ensaio de pista), ensaios relacionados com o desempenho.

É de salientar que a norma que especifica o betão betuminoso (NP EN 13108-1) refere que as misturas devem ser formuladas com recurso a ensaios baseados no desempenho. Apenas são permitidos ensaios relacionados com o desempenho dado que nem todos os países têm condições/experiência para a realização de ensaios complexos.

### 2.5.2 Metodologia de Formulação usada em Portugal

Como vimos anteriormente, existem diversas metodologias para formular uma mistura betuminosa, e a norma Portuguesa NP EN 130108-1, que define a metodologia de formulação usada em Portugal, rege-se essencialmente pela metodologia empírica de Marshall na sua formulação. Porém, a escolha final da mistura implica a realização de ensaios relacionados com o desempenho.

O método de Marshall avalia a força de rotura (estabilidade) da mistura, não medindo nenhuma propriedade fundamental da mistura. De acordo com a Norma Europeia, a formulação consiste em avaliar vários provetes com percentagens de betume que variam 0,5% entre si. Definida a presumível percentagem ótima de betume, avaliam-se duas séries abaixo e duas séries acima dessa percentagem, realizando pelo menos 3 provetes para cada série. Estes são realizados em cilindros com 101,6 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura. Existe uma restrição à dimensão máxima do agregado de 25,4 mm devido às dimensões dos provetes. Estes são compactados por um compactador de impacto de acordo com a norma EN 12697-30 (Figura 2.3a).

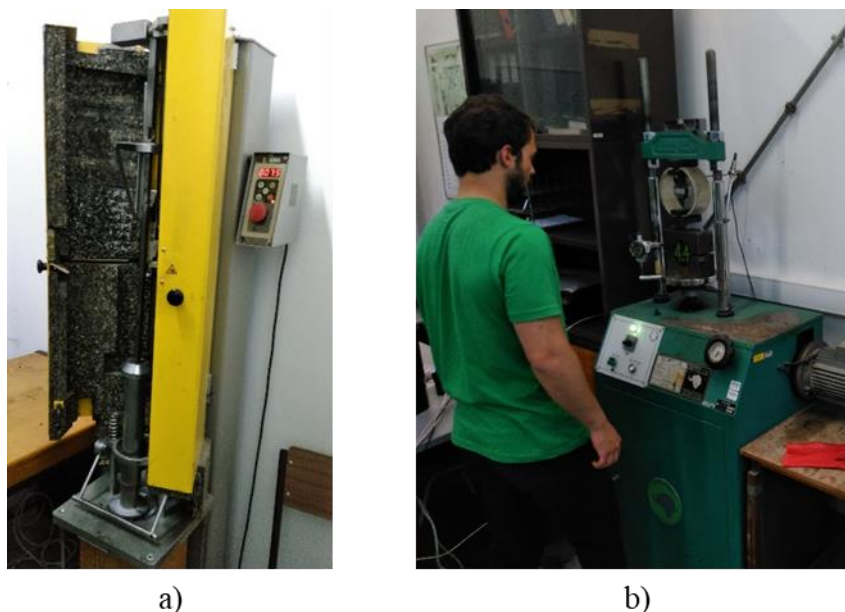


Figura 2.3 - Equipamentos do laboratório de Pavimentos Rodoviários da UC

a) Compactador de impacto; b) Prensa de compressão Marshall.

Após a compactação dos provetes, procede-se ao cálculo da baridade mediante a expressão (2.1).

De seguida, determina-se na prensa de compressão (Figura 2.3b), a “estabilidade de Marshall” e a “deformação de Marshall”. Antes do ensaio, os provetes são colocados num banho a uma temperatura de 60°C durante pelo menos 30 minutos e um máximo de 60 minutos (EN 12697-34).

Com os provetes levados à rotura determina-se a baridade máxima teórica através da expressão (2.2). Esta baridade obtém-se pesando os provetes desagregados num picnómetro sem água e mais tarde com água destilada evacuando o ar (EN 12697-8).

Com o ensaio de Marshall concluído e com os parâmetros em cima referidos determinados, é possível traçar os gráficos (baridade, estabilidade, deformação, porosidade, VMA e VFB) com as percentagens de betume escolhidas, sabendo que a percentagem ótima de betume é determinada pela média das percentagens correspondentes a três valores: máxima baridade, máxima estabilidade e ao valor médio dos limites da porosidade. O resultado dessa percentagem deve respeitar os limites impostos pelos cadernos de encargos (Branco et al., 2011).



No entanto, a Norma Portuguesa estabelece que, após a formulação pelo método de Marshall, devem ser realizados ensaios adicionais de pista (EN 12697-22) e de sensibilidade à água (EN 12697-12), com o intuito de melhorar (em 0,5%) ou confirmar a percentagem ótima de betume obtida no método de Marshall.

Para concluir, é de referir que todas as propriedades determinadas no método de Marshall dependem da energia de compactação usada no fabrico dos provetes de ensaio. A energia de compactação usada no compactador de impacto, de acordo com o Asphalt Institute (1997), depende do nível de tráfego, ou seja, pode ser de 35, 50 ou 75 pancadas por face se o tráfego for leve, médio ou pesado, respetivamente. Analisando a norma juntamente com o caderno de encargos das estradas de Portugal, pode-se afirmar que a energia de compactação para a formulação não se altera com o nível do tráfego, sendo de 75 pancadas por face.

### **2.5.3 Metodologia SUPERPAVE**

O método de formulação de misturas betuminosas SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement System – Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior) começou a ser desenvolvido em 1980 nos EUA, por terem sido encontradas nas estradas de alguns estados com tráfego pesado, rodeiras por deformação permanente das misturas betuminosas, o que constituiu um grave problema merecedor de um maior estudo.

Esta metodologia foi estudada e desenvolvida pelo programa SHRP (Strategic Highway Research Program) e é composta por 3 elementos diferentes: especificações para os betumes, especificações para os agregados e um método de formulação de misturas betuminosas com análise e previsão do seu comportamento. As especificações do betume surgiram em primeiro lugar e mais tarde as outras duas (Gardete, 2016).

Neste método são definidos 3 níveis de formulação que dependem do tráfego previsto (Quadro 2.3). No Nível 1, para se determinar a percentagem ótima de betume, apenas se recorre às propriedades volumétricas e a algumas normas da sensibilidade à água. Nos outros dois níveis de formulação 2 e 3, é necessário realizar ensaios mecânicos aos provetes e avaliar o desempenho das misturas (Silva, 2014).

Quadro 2.3 – Características dos níveis de formulação (McDaniel et al., 2011)

<b>Tráfego</b>	<b>Nível de formulação</b>	<b>Nº acumulado de eixos padrão de 80 KN</b>
Leve	1	Até $10^6$
Médio	1	$10^6$ a $10^7$
Pesado	1 e 2	$> 10^7$
Muito Pesado	2 e 3	$> 10^7$

Apesar de existirem outros métodos de compactação, nesta metodologia é frequente usar o compactador giratório para a produção dos provetes e respetiva formulação das misturas. Com este equipamento, que irá ser abordado com mais detalhe na secção 2.6, existem procedimentos a ter em conta na energia de compactação. Esta energia, na metodologia SUPERPAVE, tem 3 níveis de compactação e é definida pelo número de giros a que o provete é submetido no processo de compactação (Gardete, 2016):

*N ini* (inicial) – Número de giros utilizado para simular a compactação em obra.

*N des* (design) – Número de giros utilizado para a formulação.

*N max* (máximo) – Número de giros utilizado para simular um nível de compactação extremo.

Inicialmente estes números de giros dependiam do tráfego e da temperatura do local (Cominsky et al., 1994b). Mais tarde, descobriu-se que a temperatura exercia pouca influência, passando o tráfego a condicionar o número de giros (Brown e Buchanan, 2001).

O *N des* é o mais importante dos números de giros, pois é o que “define” a energia de compactação para se realizar a formulação da mistura betuminosa. O *N des* começou por ter valores elevados, tendo vindo a diminuir nos estudos mais recentes (Gardete, 2016). Nesta dissertação foi estabelecido um valor de 120 giros para os provetes ensaiados, conseguindo-se com o compactador giratório avaliar as propriedades volumétricas da mistura a cada giro.

Esta formulação tem como principal objetivo determinar a percentagem de betume que corresponde a uma porosidade de 4%, definida como percentagem ótima de betume. A mistura com essa percentagem deve respeitar as propriedades volumétricas definidas no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Propriedades volumétricas para misturas SUPERPAVE (Gardete, 2016).

Tráfego 20 anos (em milhões de eixos padrão 80 kN)	Grau de compactação (definido como % da baridade máxima teórica)			VMA mínimo (%)					VFB (%)	Filer/ betume
	<i>N ini</i>	<i>N des</i>	<i>N max</i>	Dimensão máxima do agregado (mm)						
				37,5	25	19	12,5	9,5		
< 0,3	≤91,5								70-80	
≥ 0,3 e < 3	≤90,5	96	≤98,0	11	12	13	14	15	65-78	0,6 a 1,2
≥ 3 e < 30	≤89,0								65-75	

#### 2.5.4 Metodologia SUPERPAVE vs outras metodologias

Segundo a Advanced Asphalt Technologies (2011), o método SUPERPAVE tem mostrado sucesso em vários aspetos, principalmente em misturas betuminosas. Neste capítulo, irão ser apresentados alguns trabalhos que evidenciam esse sucesso.

No Iraque, vias rodoviárias recentemente construídas apresentavam problemas de fendilhamento e de deformação permanente, sendo a falta do *filler* um dos principais motivos destes problemas. Num estudo realizado com diversas misturas, com diferentes percentagens de *filler*, usando dois métodos de compactação (compactação do método de Marshall – compactador de impacto com 75 pancadas por face e compactação do método SUPERPAVE – compactador giratório - 100 giros) concluiu-se que os provetes fabricados pelo método SUPERPAVE obtiveram menor porosidade do que os fabricados pelo método de Marshall, influenciando desta forma o desempenho do pavimento. Além disso, pelo método SUPERPAVE, as misturas resultantes apresentavam uma menor percentagem de ligante no que diz respeito à percentagem ótima de betume, sendo mais vantajoso em termos económicos (Qasim et al., 2017).

Nos países com climas tropicais ainda é comum usar o método de Marshall na formulação de misturas betuminosas a quente. Com o intuito de comparar o método de Marshall com a metodologia SUPERPAVE em condições semelhantes nos países tropicais, foi desenvolvido um estudo que permitiu concluir que misturas formuladas pela metodologia SUPERPAVE obtém melhores desempenhos mesmo em clima tropical (Ahmad et al., 2014).

Existem diferentes modos de compactação de uma mistura betuminosa e no Brasil foram testados alguns desses modos com o intuito de avaliar a porosidade e o comportamento

mecânico nas misturas (Leandro et al., 2017), nomeadamente com o compactador de impacto (75 pancadas/face), com o compactador giratório (moldes de 100 mm e moldes de 150 mm) e com o compactador francês (moldes de 150 mm). As alturas dos provetes ensaiados com o compactador francês são superiores ao compactador de impacto, mas para a comparação entre compactadores usaram a mesma altura.

Este trabalho permitiu concluir que:

- Comparando a mistura que foi compactada pelo compactador giratório, com diâmetro de 150 mm, com a de 100 mm e com a do compactador de impacto, apresentou menores percentagens ótimas de betume. Este poderá ter sido devido ao maior volume compactado resultado da maior movimentação do agregado nos moldes de 150 mm, como afirma o estudo.
- As configurações no compactador giratório tornam as misturas mais compactas comparativamente ao compactador francês, devido ao ângulo interno.
- A mistura com a percentagem ótima de betume obtida com o compactador giratório de 100 mm e com o compactador de Marshall provaram ser mais fiáveis no comportamento à fadiga sem comprometer a deformação permanente, em comparação com os de 150 mm.
- Avaliando a baixa porosidade obtida no compactador de impacto com os moldes de 150 mm, é aconselhável diminuir o número de giros ou compactar com um molde menor, de modo a este apresentar uma melhor representação em campo.
- Obtiveram-se melhores amostras da compactação em obra no compactador de impacto nos moldes 100 mm comparativamente ao compactador de impacto de Marshall.

## 2.6 Compactador giratório

O compactador giratório é um aparelho de compactação de misturas betuminosas que foi desenvolvido com o intuito de simular em laboratório a compactação em obra. Começou a ser usado na formulação de misturas em 1939 nos EUA, e passou por vários processos de desenvolvimento do aparelho e do método. Mas só em 1950, chegaram à conclusão de que o compactador de impacto usado no método de Marshall não simulava corretamente a compactação efetuada em obra, que apresentava melhor simulação através do compactador

giratório, Gyratory Test Machine (GTM). Este compactador apresentou-se como inovador pelo ângulo de compactação variar no processo de compactação.

Mais tarde, em 1990, estudos realizados pela Federal Highway Administration (FHWA) identificaram problemas nos compactadores giratórios já desenvolvidos, como o seu custo e o elevado ângulo na compactação, tendo sido criado um novo modelo conhecido como Superpave Gyratory Compactor (SGC) (Harman et al., 2002). O compactador giratório utilizado neste trabalho foi o modelo “Controls ICT-250”.

Em todos os tipos de compactadores consegue-se variar e controlar os parâmetros que influenciam a compactação das misturas betuminosas. Esses parâmetros são: o ângulo, a pressão, o número de giros e a frequência de giros, que na metodologia SUPERPAVE têm valores padronizados:

**Ângulo** – Ao longo do tempo foram ensaiados diversos ângulos, tendo chegado à conclusão de que o ângulo externo de  $1,25^\circ$  apresentava resultados mais consistentes e confiáveis (Huber, 1996). No entanto, apesar de todos os compactadores usarem o mesmo ângulo externo, encontraram-se diferenças no ângulo interno, o que não garantia a conformidade de resultados obtidos (Buchanan et al., 2004). Assim, ficou definido que o ângulo interno é o que se devia controlar na compactação. E que tem o valor de  $1,16^\circ$  a que corresponde um ângulo externo de  $1,25^\circ$  no compactador SGC (Prowell et al., 2003; Al-Khaateeb et al., 2002; Prowell e Brown, 2007).

**Pressão** – A pressão de compactação definida é de 600 kPa.

**Número de giros** – É definido em função da quantidade de tráfego previsto, Quadro 2.4.

**Frequência de giros** – Este parâmetro de velocidade tomava valores muito baixos, o que tornava a compactação demasiado lenta. Estudos posteriores definiram uma velocidade de 30 giros por minuto, tornando o processo de compactação mais rápido sem comprometer os resultados obtidos (Cominsky et al, 1994a).

Na Figura 2.4, pode-se observar uma representação esquemática dos diversos parâmetros de compactação (Gardete, 2016).

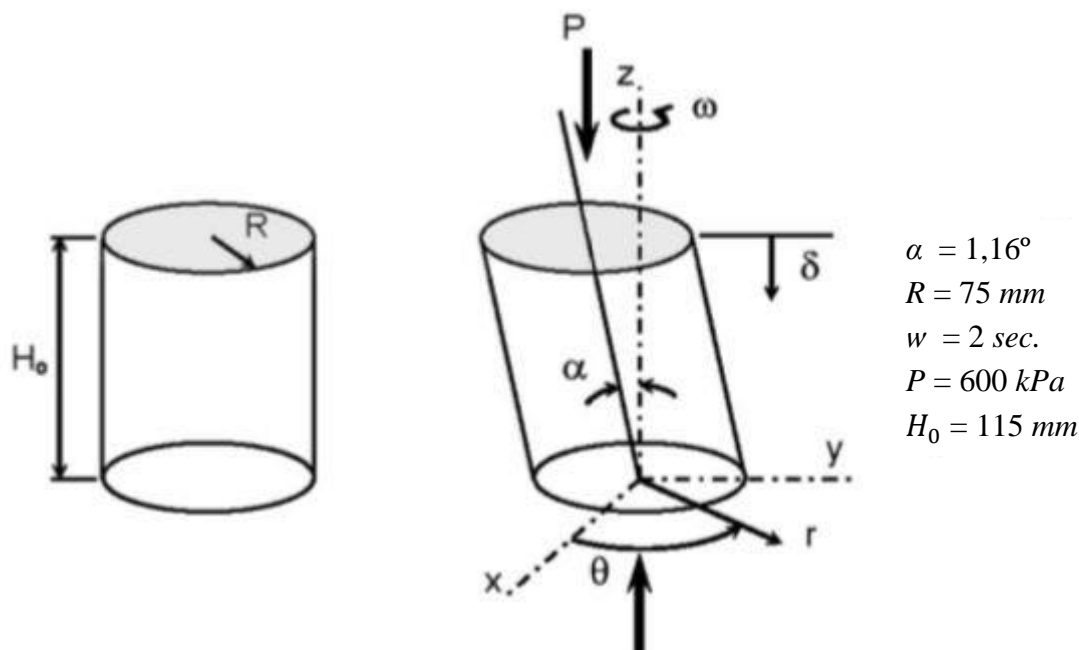


Figura 2.4 - Parâmetros de compactação (Gardete, 2016)

Onde,

$\alpha$  – ângulo interno (*graus*)

$R$  – raio do molde (*mm*)

$w$  – frequência angular (*rad/s*)

$P$  – pressão aplicada (*kPa*)

$H_0$  – altura padrão do provete (*mm*)

## 2.7 Trabalhabilidade

Correntemente, a formulação de misturas betuminosas, com diferentes tipos de agregados, preocupa-se em demasia com a estabilidade do pavimento, dificultando desta forma a colocação e a compactação das misturas (Branco et al., 2011). A trabalhabilidade de uma mistura é a facilidade de produção, de transporte, de colocação e de compactação em obra, tornando então esta propriedade essencial (Cabrera, 1991). A trabalhabilidade tem como principais componentes a espalhabilidade e a compactabilidade. Sendo a espalhabilidade definida pela capacidade da mistura betuminosa solta, em ser espalhada homogeneamente na estrada, e a compactabilidade definida pela capacidade da mistura, formar uma massa densa, ao ser pressionada pelos cilindros (Micaelo, 2008). No entanto, como a trabalhabilidade não é um processo simples de avaliar, tem sido pouco referenciado nas diversas metodologias (Gardete et al, 2016).

As misturas podem apresentar reduzida compactabilidade sob dois tipos de condições, definidas como sobretensionada (overstressed) e subtensionada (understressed). As sobretensionadas são de baixa estabilidade e são altamente deformáveis, já as subtensionadas acontecem quando se aplica pouca energia no compactador ou a mistura é demasiado estável (Gardete, 2016).

A trabalhabilidade pode depender de vários parâmetros, entre eles os da natureza do agregado, da curva granulométrica, do tipo e quantidade de ligante e da temperatura da mistura (Cominsky et al., 1994a). Desta forma, a compactação e o espalhamento da mistura betuminosa pode ser dificultada, se a mistura apresentar excesso de finos, excesso da dimensão máxima do agregado, falta de ligante ou mesmo se a temperatura do ligante na hora de colocação e compactação não for a adequada. Normalmente, a trabalhabilidade das misturas melhora com o aumento da percentagem de betume (Gardete, 2016).

Vários estudos afirmam existir uma relação linear entre a energia utilizada no compactador giratório e o número de passagens por um cilindro em obra, o que torna a análise das curvas de compactação um instrumento valioso na definição de parâmetros para avaliar a trabalhabilidade das misturas (Gardete, 2016). Os parâmetros mais usuais correspondem a constantes obtidas de equações de ajuste (Figura 2.5), ou resultantes da determinação de áreas limitadas pela curva de compactação (Figura 2.6), designados de parâmetros energéticos (DelRio-Prat et al, 2011a).

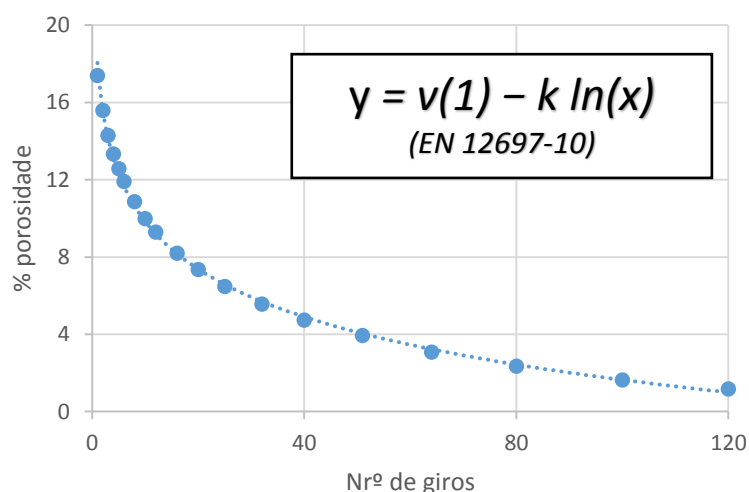


Figura 2.5 - Representação dos índices k e v(1) por uma equação de ajuste (EN 12697-10).

Os parâmetros energéticos são definidos dividindo a curva de compactação em duas partes. A primeira parte representa a densificação durante a compactação em obra e a segunda é definida

pela densificação durante o tempo de vida útil até atingir a porosidade final. Pode-se observar na Figura 2.6, dois índices que representam essas duas partes.

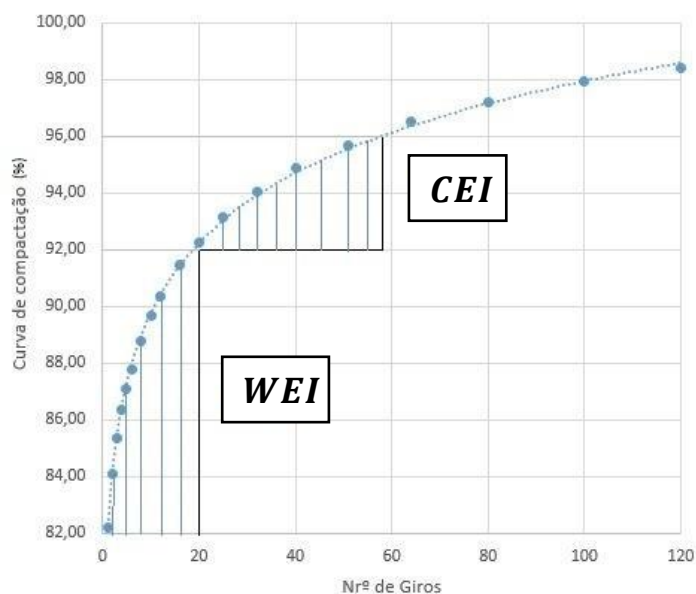


Figura 2.6- Representação (“de uma parte”) dos índices energéticos, CEI e WEI, na curva de compactação.

De seguida, são vários parâmetros da trabalhabilidade que podem ser obtidos de diversas formas. Assim, de modo a facilitar a compressão, junto a cada parâmetro é atribuído um valor que indica como este é obtido. O valor 1 indica que se trata de um parâmetro energético, o valor 2 indica que se trata de um parâmetro obtido a partir da evolução da curva de porosidade e o 3 indica que se trata de um parâmetro obtido a partir da evolução da curva de compactação.

- Espalhabilidade:

- $WI^2$  – *workability index*;

- $v(1)^2$  (EN 12697-10) – *void content for one gyration* (porosidade após o primeiro giro);

- Compactabilidade:

- $CC^2$  – *compactability index*;

- $k^2$  (EN 12697-10) – *compactability* (inclinação da curva de evolução da porosidade);



- $CS^3$  - *compaction slope*;
- $MSI^1$  - *mix stability index*;
- $WEI^1$  – *workability energy index*;
- $k \times AV^3$  – *product of the compaction slope and percentage of air voids* (inclinação da curva de compactação multiplicada pela porosidade no primeiro giro).

- Pós-Compactabilidade / Estabilidade

- $DEI^1$  – *densification energy index*;
- $CEI^1$  – *compaction energy index*.

O procedimento para a obtenção de alguns dos parâmetros referidos anteriormente, são apresentados de seguida:

- $k$  e  $v(1)$  (EN 12697-10)

Estes dois parâmetros são obtidos através da modelação da curva de evolução da porosidade. A norma EN 12697-10 indica a expressão 2.6 para o cálculo destes parâmetros. O intervalo de ciclos usado para determinação do  $k$ , foi de 1 a 120. E o  $v(1)$  é a porosidade obtida após um giro.

$$v(ng) = v(1) - (k \times \ln(ng)) \quad (2.6)$$

Onde,

$v(ng)$  – porosidade após  $ng$  giros (%);

$v(1)$  – porosidade para 1 giro (%);

$k$  – inclinação da curva de evolução da porosidade entre o ciclo 1 e o 120;

$ng$  – número de giros.

- $k \times AV$

Este é um parâmetro que se obtém multiplicando a inclinação da curva de compactação (entre 1 e 120 giros) e a porosidade da mistura (no giro 120). Trata-se de um parâmetro que representa a compactação das misturas betuminosas, bem como permite diferenciar, através da percentagem de betume, o seu comportamento (Anderson et al., 2002).

- *CC* e *WI* (Não se irão usar estes parâmetros por serem idênticos aos *k* e  $v(I)$ ).

Estes dois parâmetros são propostos por Cabrera e são obtidos a partir da modelação da curva da porosidade - equação 2.7 (Cabrera, 1996).

$$P_i = a - b \times \log(N_i) \quad (2.7)$$

Onde,

$P_i$  - porosidade após  $i$  giros (%);

$a$  - porosidade após 1 giro (%);

$b$  - inclinação da curva de compactação;

$N_i$  - giro número  $i$ .

O índice *WI* é determinado pela porosidade da mistura no primeiro giro, como se pode concluir pela expressão 2.8.

$$WI = \frac{100}{a} \quad (2.8)$$

Onde,

*WI* - *workability index*;

$a$  - porosidade para 1 giro (%).

A porosidade inicial das misturas depende de várias propriedades, como da granulometria, da percentagem de betume, da forma dos agregados e da textura superficial dos agregados (Muras, 2010). E estas apresentam valores entre 16% e 30% (Gardete, 2016).

O WI é um índice que quanto mais elevado, mais trabalhável é a mistura, logo mais fácil é a sua compactação e espalhamento. Se apresentar valores menores ou iguais a 6 pode apresentar dificuldades nessas mesmas propriedades (Gardete, 2016; Cabrera, 1996).

O CC é obtido pela inclinação da curva de compactação, expressão 2.9.

$$CC = b \quad (2.9)$$

Onde,

*CC* –compactability index;

*b* - inclinação da curva de compactação.

Este é um parâmetro que avalia a evolução da compactação da mistura com a energia aplicada, o que significa que misturas com este índice baixo necessitam de menos energia na sua compactação (Çelik Atis, 2008; Gardete, 2016).

Estes parâmetros (CC e WI) são idênticos aos da norma EN 12697-10. Observando as suas expressões podemos concluir que a diferença está no logaritmo usado. Para se obter o CC e o WI é usado o logaritmo natural e na norma EN 12697-10 é usado o logaritmo de base 10. (Gardete et al, 2016). Estes relacionam-se através das expressões 2.10 e 2.11.

$$WI = \frac{100}{v(1)} = \frac{100}{a} \quad (2.10)$$

$$CC = 2,303 * k \quad (2.11)$$

- WEI - *Workability Energy Index*

Trata-se de um parâmetro energético que corresponde à primeira parte da curva de compactação. Calcula-se multiplicando a área da secção transversal, a pressão de compactação e as respetivas alturas, como se indica na Figura 2.5. É um índice que avalia a capacidade e rapidez da mistura em compactar em obra. Quanto maior o valor do WEI, maior a facilidade e

rapidez em compactar. É um índice que até um valor mínimo de 4,5 corresponde a um bom comportamento em campo (Dessouky et al, 2011). A equação encontra-se na expressão 2.12.

$$WEI = \frac{\left(\frac{\pi * d^2}{4}\right) * P * (h_0 - h_{92})}{N_{92}} \quad (2.12)$$

Onde,

*WEI* – *Workability Energy Index* (N.m/Giros);

*d* – diâmetro do molde (m);

*P* – pressão aplicada (Pa);

*h*<sub>0</sub> – altura do provete no giro 0 (m);

*h*<sub>92</sub> – altura do provete nos 92% da curva de compactação (m);

*N*<sub>92</sub> – número de giros nos 92% da curva de compactação.

- *CEI - Compaction Energy Index*

O CEI utiliza o final da curva de compactação. Este, como o WEI, também é calculado multiplicando a área da secção transversal (Figura 2.5), a pressão e a altura. Está associado a uma maior estabilidade do pavimento durante a vida útil. Quanto maior o CEI, menor a sua estabilidade. Tem um máximo de 0,5 para uma aceitável resistência (Dessouky et al, 2011). A equação deste índice encontra-se na expressão 2.13.

$$CEI = \frac{\left(\frac{\pi * d^2}{4}\right) * P * (h_{92} - h_{96})}{N_{92} - N_{96}} \quad (2.13)$$

Onde,

*CEI* – *Compaction Energy Index* (N.m / Giros);

*d* – diâmetro do molde (m);

*P* – pressão aplicada (Pa);

*h*<sub>0</sub> – altura do provete no giro 0 (m);

*h*<sub>92</sub> – altura do provete nos 92% da curva de compactação (m);

$h_{96}$  — altura do provete nos 96% da curva de compactação (m);

$N_{92}$  — número de giros nos 92% da curva de compactação;

$N_{96}$  - número de giros nos 96% da curva de compactação.

### **3. CASO DE ESTUDO**

#### **3.1 Considerações iniciais**

Neste capítulo, será apresentado o trabalho prático realizado no Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Este trabalho implicou a realização de ensaios de caracterização dos materiais usados, o fabrico de provetes pelo compactador de impacto e pelo compactador giratório e a avaliação das propriedades volumétricas de todos os provetes. Dado o carácter académico do presente trabalho e o tempo disponível para a sua realização, foram consideradas duas percentagens de betume, não se realizando o estudo de formulação completo.

Serão demonstrados os procedimentos realizados para a obtenção dos provetes com o compactador de impacto e com o compactador giratório, bem como a calibração deste último.

Após o fabrico dos provetes, procedeu-se à determinação dos ensaios de caracterização e a uma discussão dos resultados obtidos, comparando e analisando com mais detalhe a influência dos parâmetros, ângulo interno e pressão, parâmetros estes que podem ser alterados no compactador giratório.

#### **3.2 Caracterização dos materiais**

##### **3.2.1 Agregados**

Os agregados foram fornecidos pela empresa “PRIORIDADE” e as fichas de produto encontram-se no Anexo A.

No que diz respeito aos agregados, realizou-se a análise granulométrica pelo método da peneiração (NP EN 933-1, 2014). Este ensaio tem como objetivo a separação do agregado em várias frações, através de vários peneiros com aberturas diferentes.

A norma impõe no ensaio massas dos provetes mínimas dependendo da dimensão do agregado. Logo, usam-se valores um pouco acima destes para se descobrir a curva granulométrica dos seguintes agregados: 0/2 mm (areia), 0/4 mm (pó), 4/8 mm (brita), 6/14 mm (brita) e 11/22 mm (brita).

Numa fase inicial reduziu-se a dimensão da amostra de cada agregado com o espartelador (Figura 3.1a) para ter uma amostra de ensaio representativa. De seguida, aqueceu-se o agregado a uma temperatura de 110 ( $\pm 5$ ) °C e deixou-se arrefecer num espaço fechado com sílica onde o agregado não consiga absorver humidade, e desta forma não influenciar o valor da sua massa. Depois de arrefecido pesou-se a massa e procedeu-se ao seu registo.



Figura 3.1 – NP EN 933-1) – a) uso do espartelador b) material na estufa juntamente com a sílica

Após a medição, lavou-se o agregado (Figura 3.2b) usando o peneiro de abertura 0,063 mm e secou-se o material retido medindo a sua massa. É importante que o material esteja bem limpo devendo-se realizar várias lavagens até a água sair clara. Após a pesagem, despejou-se o agregado na coluna de peneiros e agitou-se mecanicamente (Figura 3.2a) e manualmente, medindo a massa que fica retida em cada peneiro, começando pelo de maior abertura e tendo o cuidado de transferir a massa retida no de maior abertura para o seguinte. Desta forma, obtiveram-se as curvas granulométricas de cada agregado (Quadro 3.1; Figura 3.3) que será usado no fabrico da mistura betuminosa. Não foi utilizado o *filler* devido à concentração de matéria fina contida nos outros agregados.

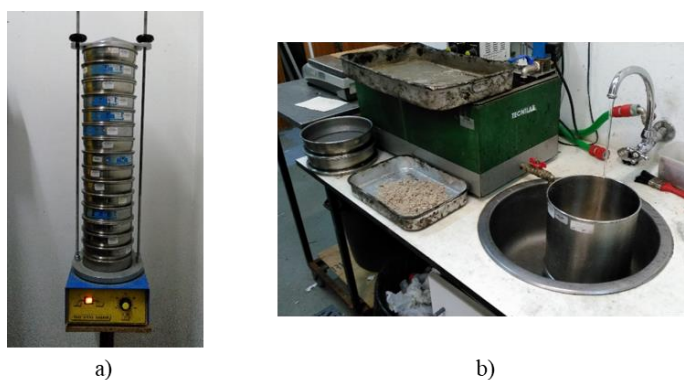


Figura 3.2 - NP EN 933-1 – a) coluna de peneiros e respetivo agitador mecânico b) lavagem dos agregados

Quadro 3.1 - Granulometria dos agregados

Abertura (mm)	Percentagem de passados				
	Areia (0/2)	Pó (0/4)	Brita (4/8)	Brita (6/14)	Brita (11/22)
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,00
20	100,0	100,0	100,0	100,0	94,14
16	100,0	100,0	100,0	100,0	46,63
14	100,0	100,0	100,0	99,3	24,18
12,5	100,0	100,0	100,0	95,3	11,23
10	100,0	100,0	100,0	63,0	1,10
8	100,0	100,0	100,0	20,9	0,47
6,3	100,0	100,0	86,5	3,4	0,43
4	100,0	97,8	12,5	1,4	0,42
2	99,7	68,5	1,8	1,2	0,41
0,5	64,2	24,8	1,4	1,2	0,41
0,125	3,2	11,3	1,3	1,1	0,39
0,063	0,7	8,8	1,1	0,9	0,36

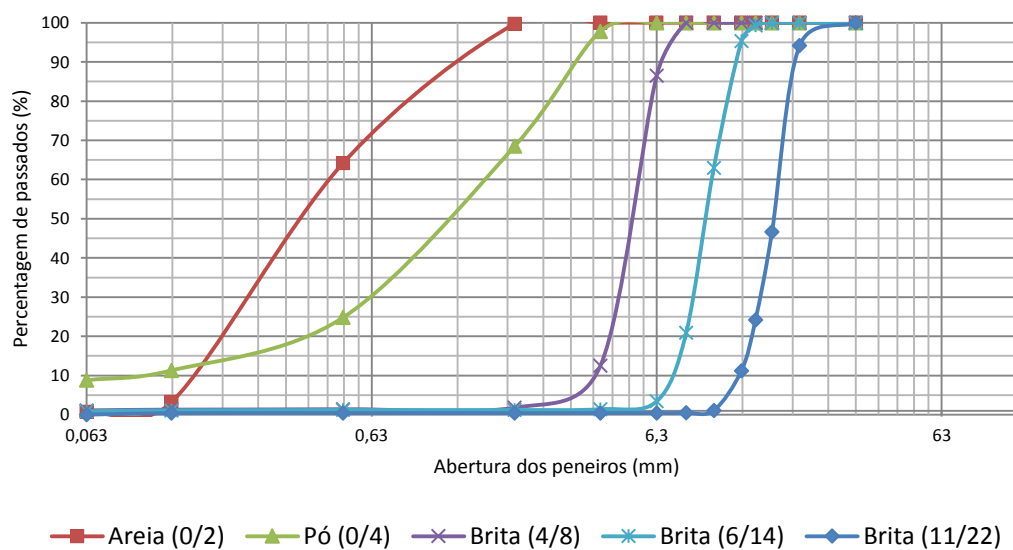


Figura 3.3 - Curvas granulométricas dos agregados

### 3.2.2 Betume

Existem vários ensaios para determinar a classe do betume de pavimentação, sendo os mais importantes, o método “Determinação da penetração com agulha” (NP EN 1426, 2017) e o método “Determinação da temperatura de amolecimento” (NP EN 1427, 2017), mais conhecido



como método do anel e bola. Neste trabalho para avaliar a classe do betume fornecido foram realizados estes dois ensaios, que são descritos de seguida.

- Determinação da penetração com agulha (NP EN 1426)

Este ensaio consiste em avaliar a consistência de betumes e ligantes betuminosos através de várias penetrações de agulhas. Este procedimento apresenta como condições de ensaio as que constam no Quadro 3.2.

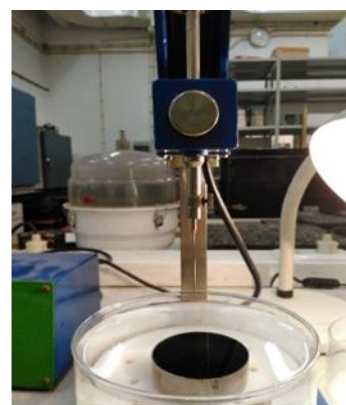
Quadro 3.2 - Condições de ensaio (NP EN 1426)

Penetração $\leq 330 \times 0,1 \text{ mm}$	
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	25
Carga (g)	100
Duração de aplicação da carga (s)	5

Numa primeira etapa, que é a preparação dos provetes, aqueceu-se o betume a uma temperatura entre  $80^{\circ}\text{C}$  e  $90^{\circ}\text{C}$  e de seguida encheu-se um recipiente próprio com betume, tendo o cuidado de o cobrir, após o enchimento, para evitar pó na sua superfície e o aparecimento de bolhas enquanto arrefecia. Arrefeceu-se à temperatura ambiente entre 60 min e 90 min (provetes com alturas menores ou iguais a 45 mm). Por último, colocou-se o provete no banho, dentro de uma tina com água, por um tempo parecido ao de arrefecimento (Figura 3.4).



a)



b)

Figura 3.4 - NP EN 1426: a) preparação do provete no banho, b) tina, provete e agulha

Com o provete pronto, colocou-se a tina com o respetivo provete no aparelho de ensaio. É importante ter 3 agulhas limpas, uma vez, que é necessário efectuar 3 medições no mesmo provete. Insere-se a agulha junto do topo do provete, onde está a camada de betume, e deve-se ter em atenção se o penetrómetro está calibrado para 0. De seguida, inicia-se o ensaio e o próprio equipamento contabiliza 5s até acabar a primeira medição (Figura 3.5). Este procedimento repete-se por mais 2 vezes, e faz-se a média dos 3 valores obtidos. Estes valores não podem variar entre si mais do que 4 mm para o ensaio ser aceite.

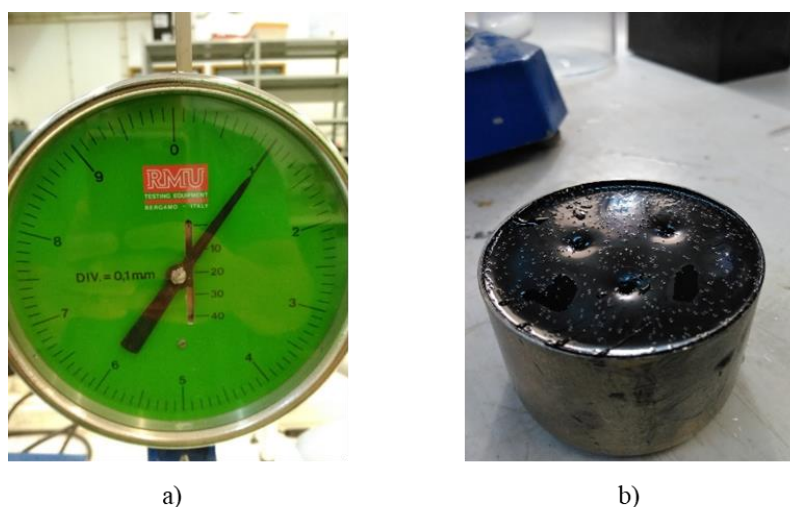


Figura 3.5 - NP EN 1426: a) Penetrómetro , b) Provete no fim do ensaio

Para uma maior credibilidade dos resultados, realizaram-se dois ensaios, cujos resultados se apresentam no Quadro 3.3:

Quadro 3.3 – Resultados dos ensaios de penetração realizados.

<b>1º Ensaio</b>		<b>2º Ensaio</b>	
1º pen.(0,1mm)	51,5	1º pen. (0,1mm)	52,0
2º pen. (0,1mm)	53,0	2º pen. (0,1mm)	50,5
3º pen. (0,1mm)	54,0	3º pen. (0,1mm)	51,5
média (0,1mm)	52,8	média (0,1mm)	51,3

- Determinação da temperatura de amolecimento (NP EN 1427)

Este ensaio avalia o comportamento do betume a temperaturas elevadas. Assim como a sua deformabilidade. Esta norma consiste em colocar duas bolas de aço por cima de duas amostras

de ligante betuminoso, dentro de um recipiente com água enquanto se aumenta controladamente a temperatura até caírem as respectivas bolas. No que diz respeito à preparação dos provetes, aqueceu-se o betume de tal forma a conseguir-se manusear e colocou-se dentro de dois anéis de latão. Arrefeceu-se pelo menos 30 min e depois de arrefecidos cortou-se o excesso de ligante de forma a ter uma superfície lisa e plana com o mesmo nivelamento do rebordo superior do anel (Figura 3.6a).

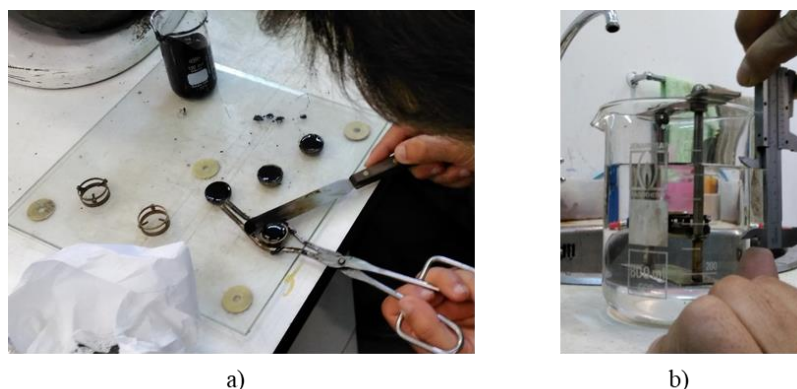


Figura 3.6 - NP EN 1427: a) Excesso de betume a ser removido do anel, b) Medição da altura de água necessária.

Ainda antes de se dar início ao ensaio colocou-se no recipiente os anéis em água gelada a  $(5\pm 1)$  °C, durante 15 min. A quantidade de água colocada no recipiente de ensaio deverá ter uma altura de  $(50\pm 3)$  mm desde o rebordo superior dos anéis (Figura 3.6 b).

Com o material preparado, aqueceu-se a água a uma velocidade constante de 5°C/min e registou-se a temperatura à qual o betume se deformou 25 mm. Para o ensaio ser aceite, a diferença entre as temperaturas das duas bolas, não pode ser superior a 1°C. As temperaturas médias obtidas nos dois ensaios foram, respetivamente, 46°C e 48°C. Na Figura 3.7, apresenta-se um ensaio concluído.

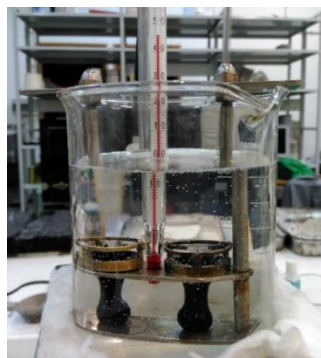


Figura 3.7 - NP EN 1427: Fim de um ensaio realizado.

- Conclusão dos resultados obtidos nos ensaios

Para finalizar a verificação do betume, recorreu-se ao Quadro 3.4 onde se encontram as propriedades e exigências a cumprir. Conclui-se que os valores obtidos no ensaio se encontram um pouco baixos para a gama escolhida e avaliada (50/70), mas a não ultrapassar os seus valores mínimos.

Quadro 3.4 - Propriedades e exigências de conformidade (Branco et al., 2011)

Propriedades (Condições de ensaio)	Tipos de betume e exigências de conformidades	
	Tipos	50/70
Penetração (0,1 mm) (25°C, 100 g, 5s)	min.	50
	max.	70
Temperatura de amolecimento método anel e bola (°C)	min.	46
	max.	54

### 3.2.3 Mistura

Nesta dissertação recorreu-se a uma mistura bastante utilizada em Portugal, nas camadas de base, ligação e de regularização, o “AC 20 base/bin/reg 50/70 (MB)”. Esta designação veio substituir a do “Macadame Betuminoso Fuso A”, de acordo com o caderno de encargos da pavimentação (EP, 2014). Para facilitar, irá designar-se a mistura por apenas AC20 (MB).

Com as curvas granulométricas obtidas dos agregados, respeitando os limites impostos (Quadro 3.5) pelo caderno de encargos e variando as percentagens de cada agregado obteve-se a curva que se encontra na Figura 3.8. Não se conseguiu obter uma curva na média dos limites impostos, mas, no entanto, nunca se ultrapassaram estes.

Como referido anteriormente, tendo em conta o carácter académico e o tempo, não foi possível efectuar o estudo de formulação completo. Normalmente a percentagem de betume de um AC 20 (MB) varia entre 4% a 5% (Ferreira e Almeida; 2015), pelo que se optou por comparar e avaliar neste trabalho as percentagens de 4,5% e 5% de betume.

Quadro 3.5 – Formulação da mistura dos agregados

Peneiro (mm)	Limite Inferior	Limite Superior	Pó 0/4	Areia (0/2)	Brita 4/8	Brita 6/14	Brita 3 (11/22)	Mistura	
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>	
20,0	90,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	94,0	<b>98,4</b>	
12,5	57,0	86,0	100,0	100,0	100,0	95,3	11,0	<b>75,1</b>	
4,0	34,0	49,0	97,8	100,0	12,5	1,4	0,0	<b>46,5</b>	
2,0	26,0	41,0	68,5	99,7	1,8	1,3	0,0	<b>34,4</b>	
0,50	12,0	26,0	24,8	64,2	1,4	1,2	0,0	<b>14,9</b>	
0,125	4,0	14,0	11,3	3,20	1,3	1,1	0,0	<b>4,9</b>	
0,063	2,0	7,0	8,8	0,7	1,1	0,9	0,0	<b>3,7</b>	
			<b>Mistura</b>	<b>38,0%</b>	<b>8,0%</b>	<b>9,0%</b>	<b>18,0%</b>	<b>27,0%</b>	<b>100,0%</b>

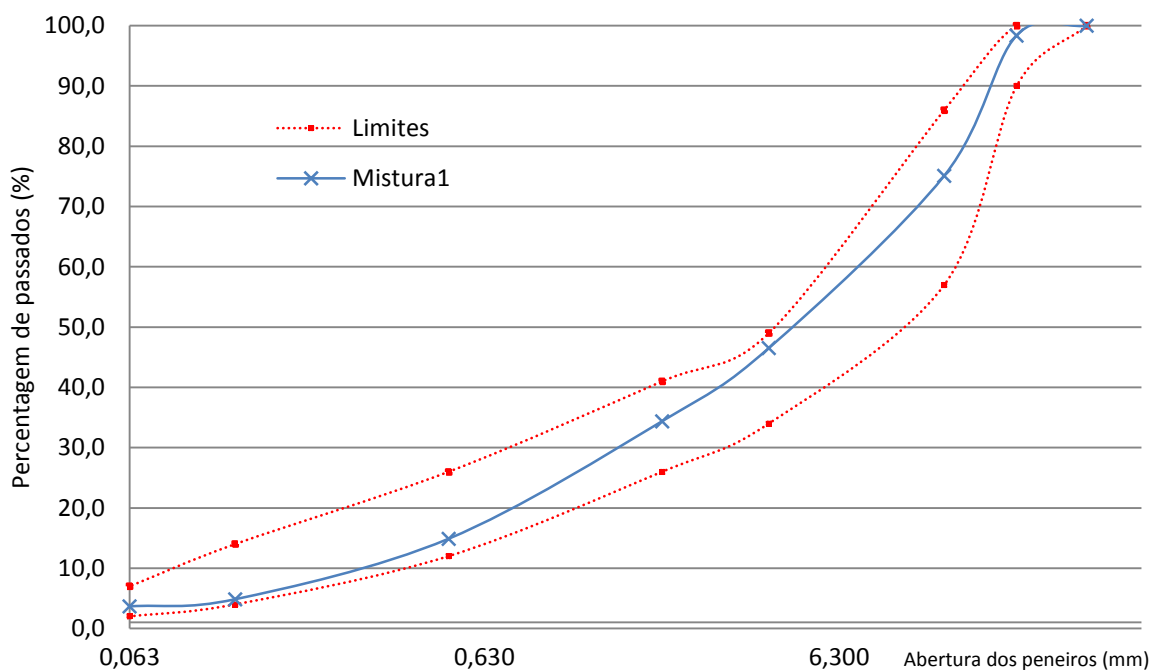


Figura 3.8 - Formulação da mistura dos agregados

### 3.3 Compactador giratório

Antes de proceder à compactação dos provetes com o compactador giratório, foi necessário verificar a calibração do equipamento para se poder ter confiança nos resultados obtidos, tendo sido aferido o ângulo interno, a altura, a rotação e a pressão. A rotação e a pressão não carecem de qualquer equipamento adicional para a sua calibração, usando apenas o seu programa para tal efeito. Já o ângulo interno e a altura vão ser explicados de seguida.

- Calibração do ângulo interno

A obtenção do ângulo interno com precisão é um aspeto importante para se obter resultados credíveis. No entanto, este ângulo é de difícil determinação devido ao pequeno intervalo de ângulos ( $0,82^\circ$  a  $1,16^\circ$ ), e tendo em conta que o único ângulo que realmente interessa é o que está a compactar a mistura dentro do molde, sendo impossível a sua determinação pelo exterior. Para a determinação do ângulo interno, socorre-se ao aparelho denominado ILS – *Invelop Load Simulator* (Figura 3.9) que permite determinar com precisão este ângulo, simulando uma mistura dentro do molde.

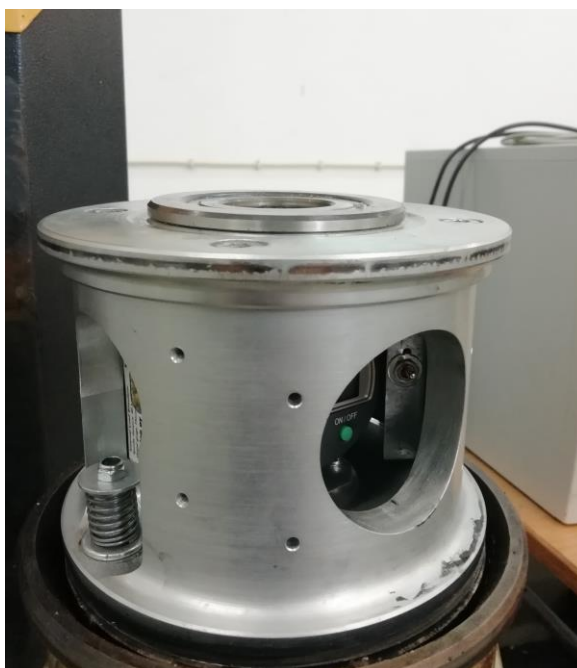


Figura 3.9 - ILS (*Invelop Load Simulator*)

Seguindo o procedimento do manual de calibração do ILS foi possível obter os resultados que se encontram no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Resultados da calibração com o ILS

	Ângulos em graus		
	50 scale	35 scale	20 scale
upper s/anel	1,30	1,05	0,92
upper c/anel	1,22	0,98	0,85
bottom s/anel	1,05	0,86	0,86
bottom c/anel	1,29	1,10	0,93
<b>Média / Nova calibração</b>	<b>1,19</b>	<b>0,96</b>	<b>0,87</b>
Antiga calibração	1,40	1,17	1,02

- Calibração da altura

A calibração da altura é um processo mais simples. Com o programa do SGC e algumas ferramentas fornecidas pelo equipamento utilizado (Figura 3.10), conseguimos obter a altura medida.



Figura 3.10 - Simulador da mistura para calibrar a altura

### 3.4 Fabrico dos provetes

Com a mistura determinada e com o compactador giratório calibrado, procedeu-se ao fabrico dos provetes. Neste trabalho foram avaliadas duas misturas AC 20 (MB), com percentagens de betume 4,5% e 5,0%.

No esquema da Figura 3.11, pode-se observar os tipos de ensaios que foram realizados variando alguns parâmetros.

No ensaio de Marshall usando o compactador de impacto foram produzidos 3 provetes para cada energia de compactação, 50 pancadas/face e 70 pancadas/face, dando um total de 12 provetes compactados, tendo em conta as duas misturas avaliadas. No entanto, por se ter cometido alguns erros no seu fabrico, estes não serão contabilizados.

Com o compactador giratório foram produzidos 2 provetes para cada parâmetro avaliado. Modificando os ângulos e pressões, iremos ter um total de 20 provetes produzidos com as duas misturas diferentes. Foi decidido avaliar os ângulos de 20, 35 e 50 scale, 0,87°, 0,96° e 1,19° graus, respetivamente. Sabendo que a pressão normalmente usada é a de 600 kPa, decidiu-se usar essa na mudança dos ângulos, apenas variando a pressão de compactação no ângulo de 0,96°.

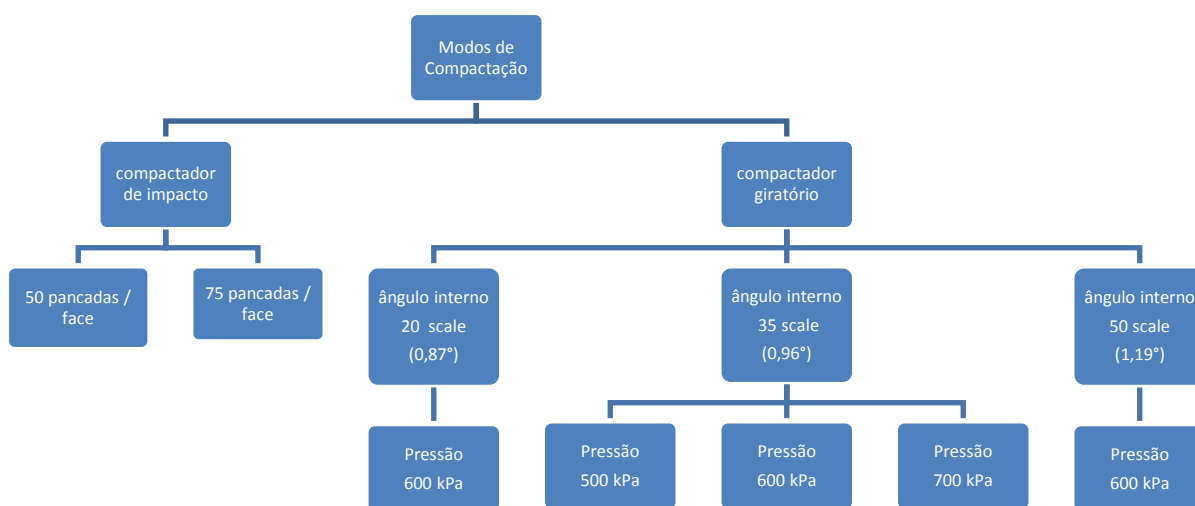


Figura 3.11 - Esquema dos ensaios realizados e respetivas variações

A mistura selecionada foi produzida de igual forma quer para o compactador de impacto quer para o compactador giratório, diferindo na quantidade de material que os provetes do



compactador giratório exigem. De acordo com a norma EN 12697-35, o betume escolhido (50/70) para a mistura deverá permanecer 3 a 5 horas na estufa a uma temperatura de 150° C, e os agregados deverão permanecer pelo menos 8 horas a 165°C. No entanto, quando se retiram os materiais, estes arrefecem, pelo que se optou pela temperatura do betume na estufa de 165°C e dos agregados de 180°C.

Para a mistura do betume com os agregados utiliza-se uma misturadora mecânica (Figura 3.12a), que também deverá ser aquecida antes de se misturar. A norma indica que, para este tipo de misturas mecânicas, o tempo de mistura não deverá ultrapassar os 3 minutos.

Após a mistura estar completa, colocou-se a mistura na estufa a uma temperatura de 165°C (Figura 3.12b), por um tempo máximo de 3 horas. Este processo realiza-se com o intuito do agregado absorver um pouco o betume antes da compactação. Adicionalmente, antes da compactação dos provetes, colocaram-se na estufa os moldes, para que não se verifique o arrefecimento da mistura.



a)



b)

Figura 3.12 - a) misturadora mecânica do laboratório de pavimentos da UC b) mistura na estufa antes da compactação

- Compactador de impacto

A quantidade de material usada foi estipulada de acordo com um teste feito como indica a norma EN 12697-30, resultando a quantidade de 1200g para cada provete. Os moldes usados nesta compactação têm um diâmetro 101,6 mm e uma altura de 63,5 mm (Figura 3.13), como já referido na secção 2.5.2.

Antes de despejar a mistura no molde, colocou-se um círculo de papel de filtro dentro do molde. Depois de se inserir a mistura no molde, colocou-se outro círculo de papel de filtro em cima da mistura e selecionou-se o número de pancadas desejadas, tendo-se iniciado a compactação logo de seguida. Para a realização deste processo é necessário ter em conta que o número de pancadas é por face do provete. Após a compactação realizada e depois do seu arrefecimento, deve-se remover o provete do molde e proceder à sua identificação.



Figura 3.13 - Moldes do compactador de impacto.

- Compactador giratório

A quantidade de material usada nos provetes varia entre 4500 g e 4700 g para se obter a altura desejada. Os moldes são cilíndricos com um diâmetro de 150 mm e com uma altura de 115 mm.

Quando a mistura estiver pronta para a compactação, coloca-se dentro do molde uma placa inferior, um círculo de papel de filtro e a mistura. Por cima, o processo é igual. Seleciona-se os parâmetros que vão ser avaliados e inicia-se a compactação.

Após a compactação, deixa-se arrefecer um pouco o provete no molde para este ganhar alguma consistência e desta forma não se desmoldar durante a extração (Figura 3.14a). O período de arrefecimento não deverá ser muito longo pois pode dificultar a desmoldagem. Por último, enumera-se o provete compactado (Figura 3.14b).

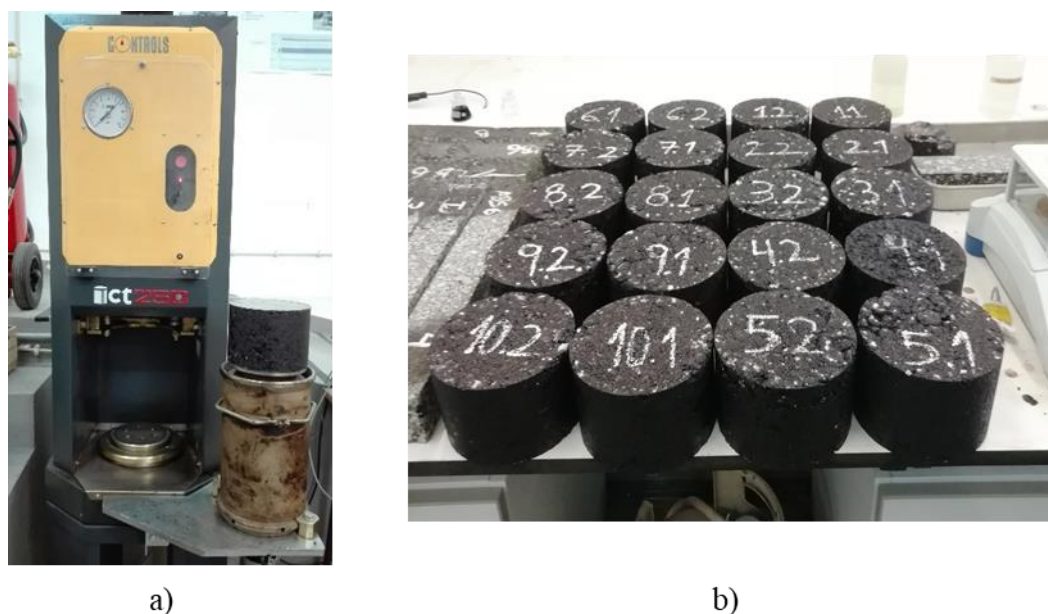


Figura 3.14 - a) compactador giratório e um provete a arrefecer após a compactação b) provetes compactados com o compactador giratório.

### 3.5 Porosidade, VMA e VFB

Nesta parte do trabalho, apresentam-se os resultados de algumas características já mencionadas na secção 2.3, como a porosidade, VMA e VFB. No entanto, para o cálculo desses é necessário obter a baridade e a baridade máxima teórica que também será mencionada nesta secção. Adicionalmente, mediu-se a altura de cada provete após extração para ambos os compactadores.

A baridade SSD é determinada de igual forma para os provetes fabricados em ambos os compactadores e seguem o procedimento respeitando a norma EN 12697-6, de acordo com a expressão 2.1. Começou-se por pesar a massa do provete seco obtendo  $m_1$ , depois colocou-se o provete na água durante 30 min e pesou-se a sua massa imersa (Figura 3.15b),  $m_2$ . Ter em atenção e registar com um termómetro a temperatura da água (Figura 3.15a). Retira-se o provete da água e limpa-se a sua superfície. Nestas condições faz-se a última pesagem obtendo o  $m_3$ .

Os resultados das baridades podem ser consultados, por compactador, no Anexo B.

A baridade máxima teórica é calculada através da expressão 2.2. Esta não depende do tipo de compactação, dependendo apenas da mistura usada. A norma EN 12697-5 indica para se desfazer numa primeira parte os provetes compactados até que estes tenham uma dimensão inferior a 6 mm. Se necessário, aquecer a mistura na estufa a uma temperatura inferior a 100°C

para ser mais simples a sua desagregação (Figura 3.16a). Quando a mistura estiver desagregada coloca-se num picnómetro de vácuo específico (Figura 3.16b) com água destilada. Deixa-se pelo menos 30 minutos devendo agitar ou mesmo dando leves pancadas no picnómetro para ajudar a expulsar o ar. Existem medições a serem feitas durante este processo, como se mostra na expressão 2.2.

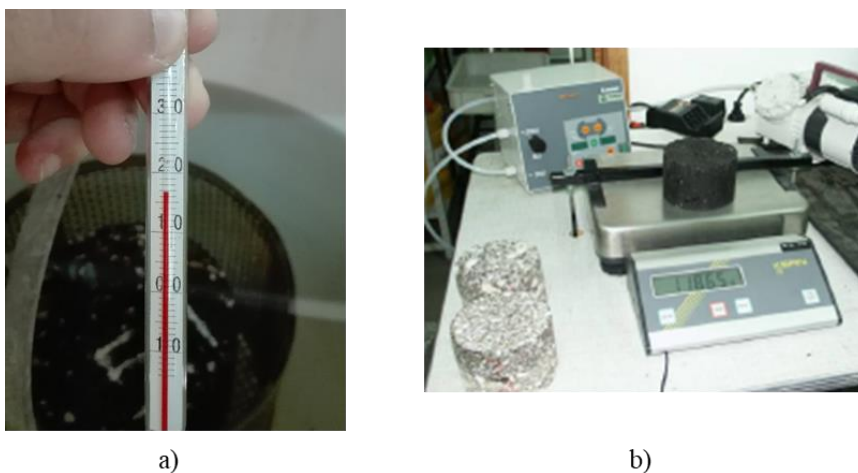


Figura 3.15 - a) temperatura medida durante um ensaio b) balança para o cálculo da baridade

Esta característica é bastante importante por imensos parâmetros dependerem dela. No entanto, por vezes é difícil a sua determinação. Esta pode ser devido ao equipamento usado ou mesmo à má desagregação do material que não permite isolar completamente as partículas do agregado, não removendo assim totalmente o ar. Assim sendo, realizaram-se dois ensaios para cada mistura, tendo-se obtido os seguintes valores médios:  $2509,7 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  para a mistura de 4,5%, de e  $2477,6 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  para a mistura de 5%.

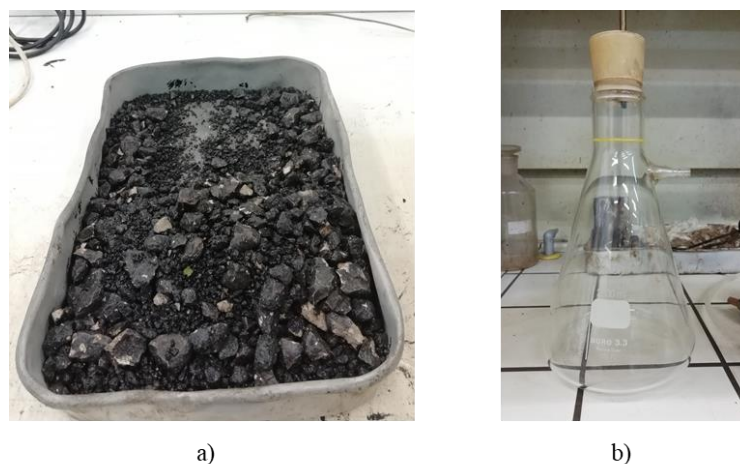


Figura 3.16 - a) mistura desagregada, b) picnómetro de vácuo.

A porosidade, o VMA e o VFB são calculados uma vez determinada a baridade e a baridade máxima teórica. No Anexo 2, podem-se encontrar os valores da baridade para todos os provetes ensaiados por compactador.

No que se refere aos dados obtidos pelo programa do compactador giratório, é possível obter a baridade da mistura, sabendo a altura na compactação e a quantidade de material inserida. No entanto, determinando a baridade dos provetes após extração, concluiu-se que esta, não era igual à baridade registada pelo compactador. Isto pode ser devido à perda de material ao inserir no molde para o ensaio. Decidindo desta forma usar a baridade obtida experimentalmente para a análise da porosidade, do VMA e do VFB.

Ainda analisando o Quadro B.2, no Anexo B, pode-se observar que as alturas obtidas pelo compactador giratório e as medidas após extração dos provetes não diferem muito. No entanto, algumas normas indicam que para a análise dos provetes compactados neste equipamento e com os problemas da baridade juntamente com os da altura, estes devem ser avaliados através de um parâmetro da compactação que corrige esses problemas, expressão (3.1) (TxDOT, 2010).

$$\%BMT_x = \frac{\rho * h_m}{BMT * h_x} * 100 \quad (3.1)$$

Onde,

$\%BMT_x$  – compactação relativa em percentagem da baridade máxima teórica no giro x (%)

$BMT$  – baridade máxima teórica ( $kg/m^3$ )

$h_x$  – altura do provete medida pelo equipamento no giro x ( $mm$ )

$h_m$  – altura medida do provete ( $mm$ )

$\rho$  – baridade experimental da mistura ( $kg/m^3$ )

De seguida, para facilitar a análise de resultados, decidiu-se apresentar cada característica num só gráfico, independentemente do compactador usado ou do parâmetro variado, a porosidade, o VMA e o VFB (Figura 3.17, Figura 3.18 e Figura 3.19, respectivamente). Posteriormente, apresenta-se a evolução das mesmas características com o número de giros no compactador giratório. Nesta análise os provetes compactados pelo compactador de impacto não serão analisados.

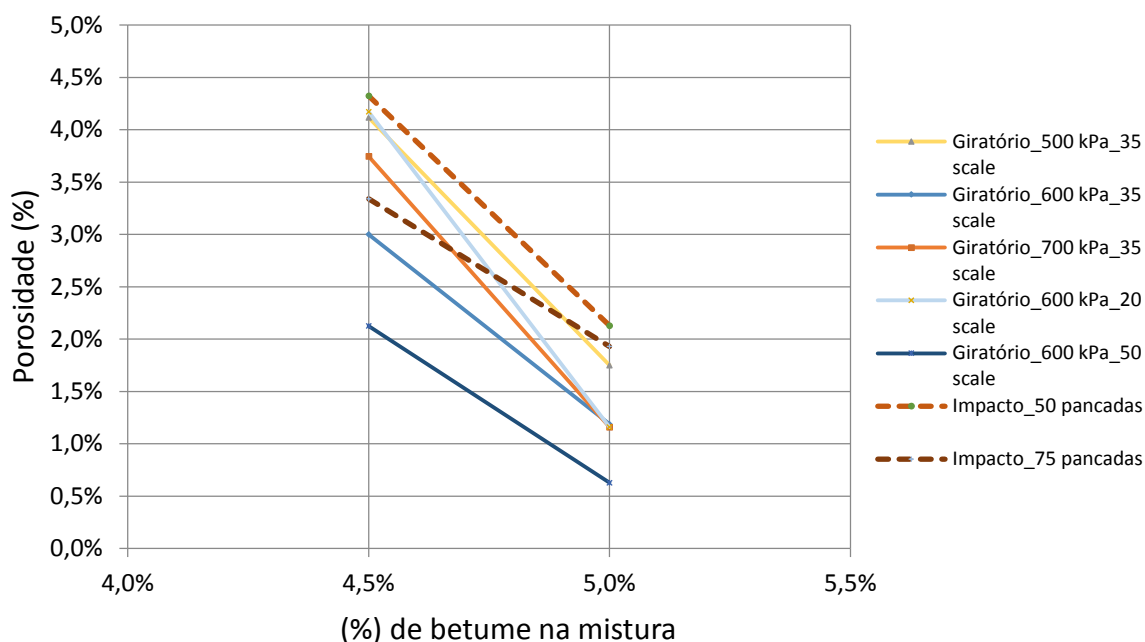


Figura 3.17 - Porosidades para ambas as misturas, 4,5% e 5,0% de betume.

No que diz respeito à energia aplicada nos provetes, pode-se concluir que quanto maior a energia aplicada menor é a porosidade obtida, comparando as 50 com as 75 pancadas no compactador de impacto e as diferenças de pressões no compactador giratório. Apesar de nos provetes compactados com uma pressão de 600 kPa e 700 kPa não se verificar, obteve-se valores muito idênticos.

Variando os ângulos no compactador giratório, ao contrário da pressão, observam-se resultados mais afastados uns dos outros. É possível afirmar, que as escolhas dos ângulos, nestas análises, exercem uma maior influência.

Comparando os resultados do ponto de vista do equipamento, pode-se concluir que os valores de porosidade mais altos foram obtidos com o compactador de impacto aplicando uma energia de 50 pancadas/face. E os valores mais baixos foram obtidos com o compactador giratório utilizando um ângulo interno correspondente a 50 scale, o maior ângulo utilizado. Estes resultados fazem sentido, porque aplicando uma menor energia, o volume de vazios existente irá ser maior. E quando se utiliza um maior ângulo na compactação poderá ajudar no reajuste dos agregados, preenchendo os espaços vazios existentes. Desta forma, obtém-se valores de porosidade menores.

No caderno de encargos (EP, 2014) para uma mistura da camada de base AC20, a porosidade assume valores de 3% para o limite mínimo e 6% para o limite máximo. Concluindo que apenas

a porosidade obtida pela mistura de 4,5% respeitam esses limites, exceto o resultado obtido pelos provetes “Giratório\_600kPa\_50”.

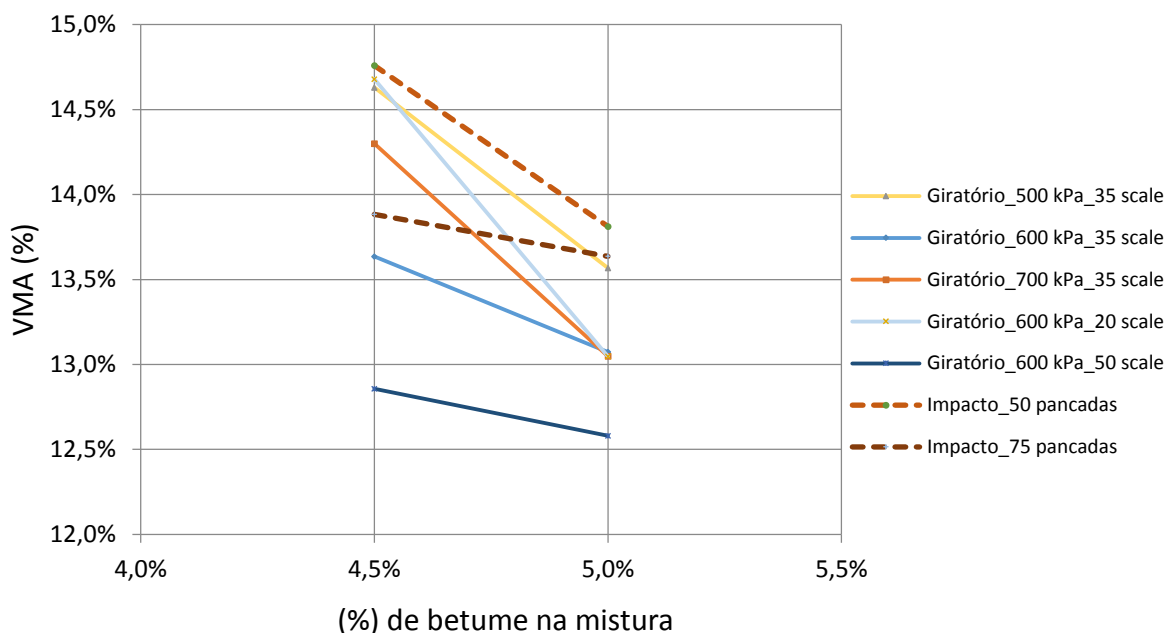


Figura 3.18 - VMA para ambas as misturas, 4,5% e 5,0% de betume.

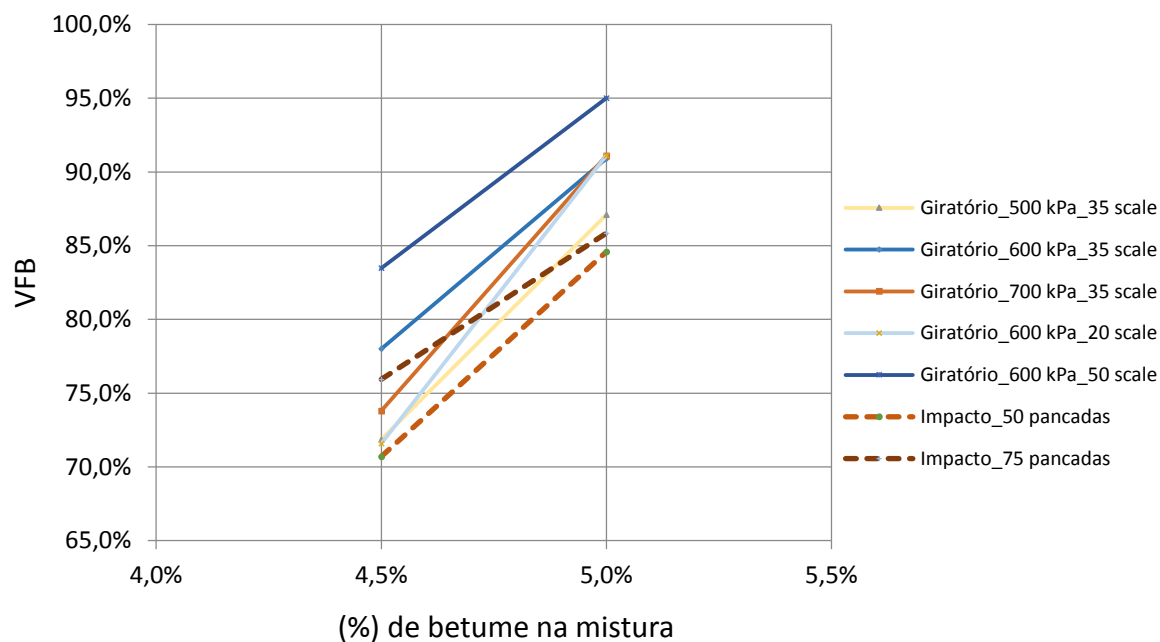


Figura 3.19 - VFB para ambas as misturas, 4,5% e 5,0% de betume.

No que diz respeito ao volume que não é ocupado por agregado, VMA, as conclusões são semelhantes às obtidas na análise dos resultados da porosidade. Assim sendo, obteve-se uma mistura mais compacta com os provetes sujeitos a uma energia de compactação maior e com maiores ângulos internos. Já o limite mínimo imposto pelo Caderno de Encargos (EP, 2014) é de 14%. Apenas são respeitados os provetes “Giratório\_700kPa\_35scale”, “Giratório\_600kPa\_20”, “Giratório\_500kPa\_35” e “Impacto\_50 pancadas” na mistura de 4,5% de betume.

No VFB faz sentido o valor ser maior quando a energia de compactação é maior, que é o que acontece no gráfico da Figura 3.19. Quanto maior a energia de compactação e o ângulo interno utilizados, maior é a percentagem de betume no VMA, diminuindo o espaço ocupado pelo ar.

Como foi mencionado anteriormente, para o compactador giratório, apresenta-se a evolução destas características ao longo do número de giros (Figura 3.20; Figura 3.21; Figura 3.22) para ambas as misturas, com 4,5% e 5,0%.

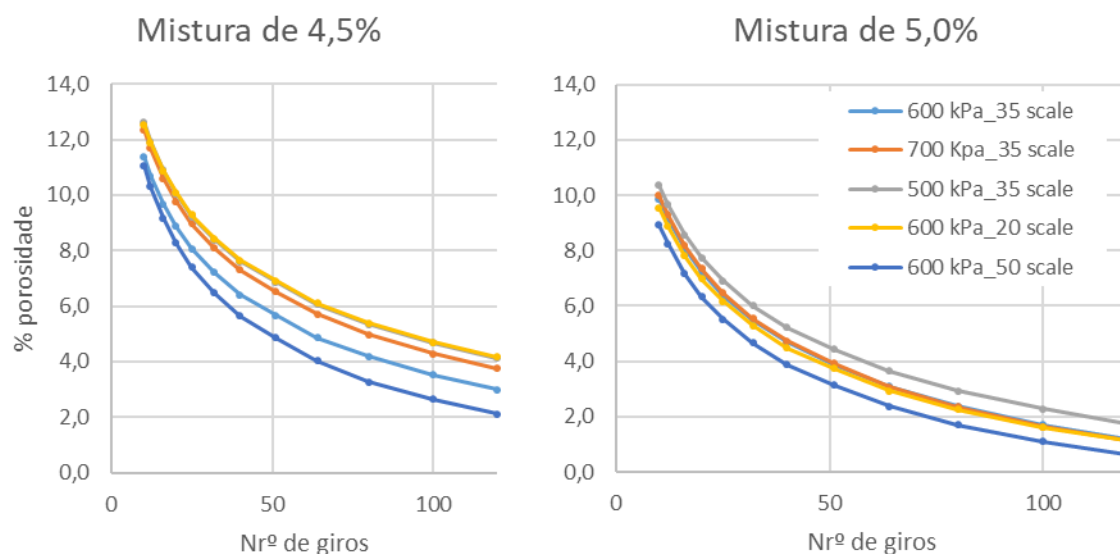


Figura 3.20- Evolução da porosidade, nas misturas de 4,5% e de 5%, compactada com o compactador giratório.

Para ambas as misturas, os valores da porosidade no início da compactação assumem valores muito próximos e acabam por se destacar mais no final da compactação (aos 120 giros). Entende-se mais uma vez, que os ângulos internos parecem ter uma importância maior nos resultados do que as pressões. Esta conclusão observa-se melhor no gráfico da mistura de 4,5% do que no gráfico da mistura de 5,0%, visto que esta última tem valores muito próximos. Observa-se também que as porosidades para a mistura de 4,5% obteve valores entre 2,0% e 4,0%, enquanto a mistura de 5,0% obteve valores abaixo dos 2%.



Na Figura 3.21, apresenta-se a evolução do VMA para ambas as misturas e na Figura 3.22, a evolução do VFB.

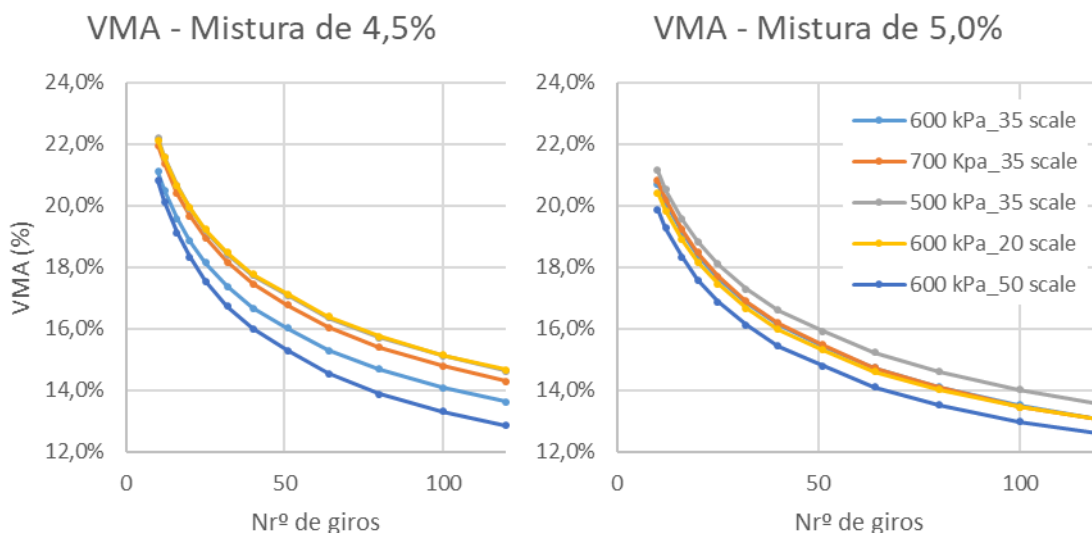


Figura 3.21 - Evolução do VMA, nas mistura de 4,5% e 5,0%, compactada no compactador giratório.

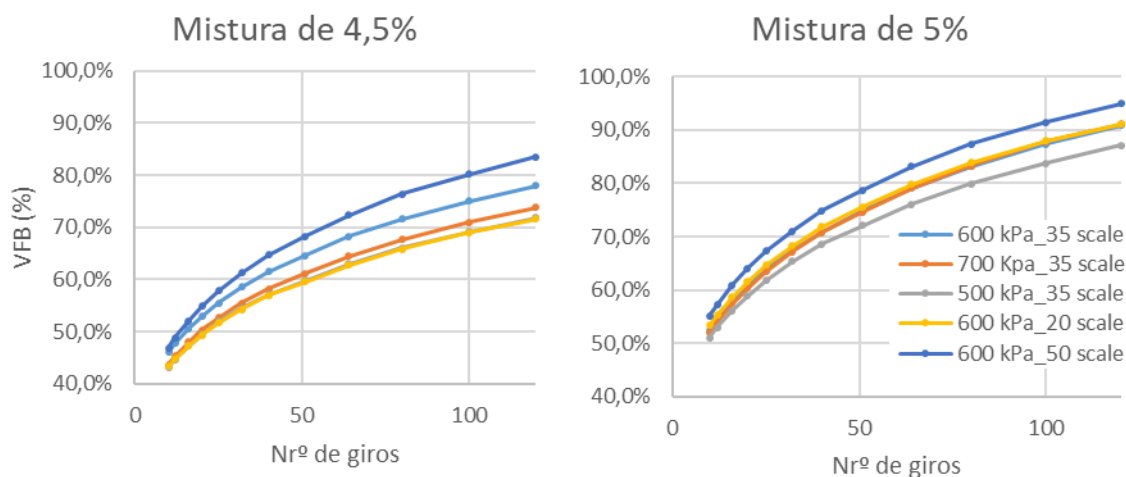


Figura 3.22 - Evolução do VFB, na mistura de 4,5% e 5,0%, compactada no compactador giratório.

As conclusões obtidas na porosidade também se aplicam ao VMA. Observam-se poucas diferenças na evolução dos resultados da mistura de 5,0% e uma maior influência do ângulo em comparação com a pressão.

No VFB, analisando o tipo de mistura, faz sentido ter valores superiores na mistura de 5,0%, visto que esta característica indica o volume de betume no VMA. Analisando as diferenças entre parâmetros, também faz sentido que quanto maior a energia de compactação, maior é o VFB.

Apesar de não terem sido testadas cinco percentagens de betume, como num estudo de formulação completo, pode-se concluir que para uma porosidade de 4,0%, a percentagem ótima de betume seria inferior a 4,5% para um *N des* de 100 giros (Figura 3.23).

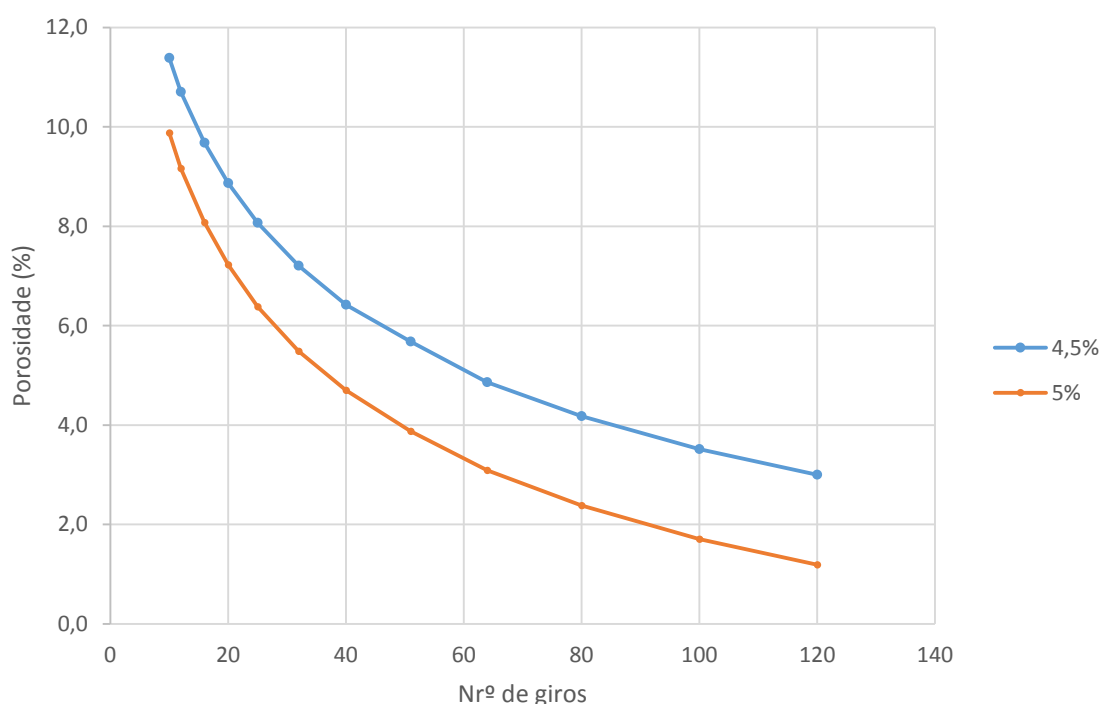


Figura 3.23 - Evolução da porosidade na mistura de 4,5% e 5,0% de betume, com uma pressão de 600 kPa e com o ângulo correspondente a 35 scale.

### 3.6 Ensaio de compressão Marshall

Nesta secção apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos no ensaio de compressão Marshall (Figura 2.3b), isto é, a “estabilidade Marshall” e a “deformação Marshall”, gráficos da Figura 3.24 e Figura 3.25, respectivamente.

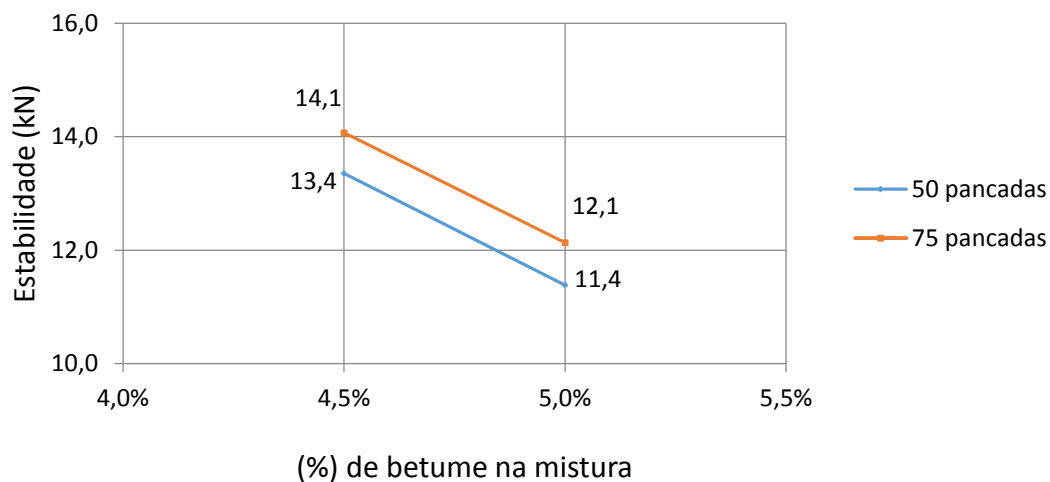


Figura 3.24- Estabilidade Marshall.

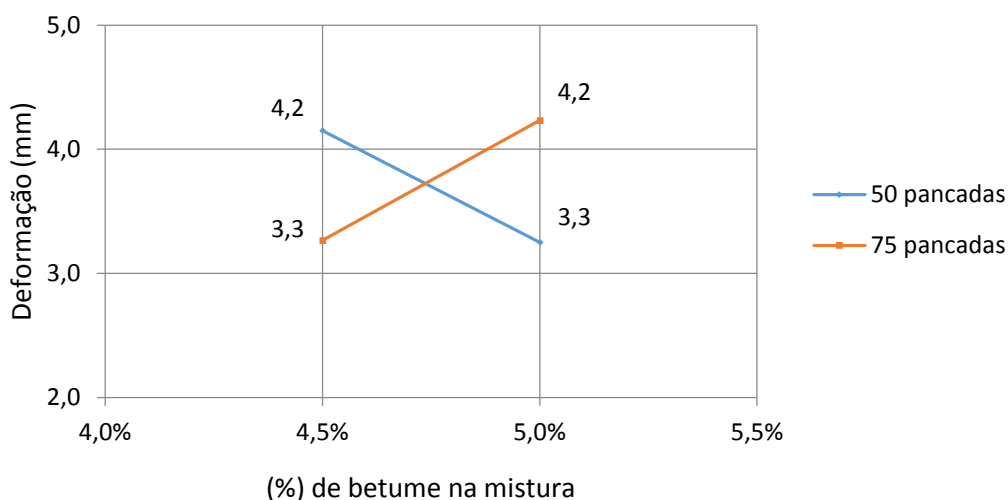


Figura 3.25- Deformação Marshall.

Apesar de só termos duas percentagens de betume, observa-se no gráfico da Figura 3.24, da estabilidade, que esta é menor quanto menor a energia de compactação e quanto menor a percentagem de betume. Sabendo que o cálculo da percentagem ótima de betume entra com o valor máximo da estabilidade, pode-se concluir que esta está mais perto da mistura de 4,5%.

Já no gráfico da Figura 3.25, da deformação, com os resultados obtidos não se consegue concluir nada de concreto, apenas que variam de 4,2 mm a 3,3 mm. Observa-se também uma evolução anormal nos provetes compactados com 50 pancadas por face, uma vez que teoricamente, a deformação tende a aumentar com a percentagem de betume.

Os requisitos no Caderno de Encargos apontam para valores mínimos e máximos de 7,5 kN e 15 kN na estabilidade e 3 mm e 4 mm na deformação (EP, 2014). Estes valores apenas para uma energia de compactação de 75 pancadas. Analisando os valores obtidos pode-se concluir que os valores se inserem dentro dos requisitos para a estabilidade. Para a deformação, pode-se concluir que a mistura de 5% encontra-se fora do intervalo imposto.

### 3.7 Trabalhabilidade

Neste trabalho não serão analisados todos os parâmetros de trabalhabilidade referidos no Capítulo 2. Contudo, selecionou-se um parâmetro de cada tipo, isto é, de espalhabilidade, de compactabilidade e de estabilidade, e dois índices energéticos, um da primeira e outro da segunda parte da curva de compactação. Convém referir que na escolha dos parâmetros energéticos, teve-se em consideração o índice da pressão na expressão, que pode ser alterada.

Os parâmetros avaliados neste trabalho são os seguintes:

- $k$  - *compactability* (inclinação da curva de evolução da porosidade);
- $v(1)$  - *void content for one gyration* (porosidade após o primeiro giro);
- $k \times AV$  - *product of the compaction slope and percentage of air voids* (inclinação da curva de compactação multiplicada pela porosidade no primeiro giro);
- $WEI$  - *workability energy index*;
- $CEI$  - *compaction energy index*.

A Figura 3.26 apresenta os resultados do parâmetro  $k$  para as misturas de 4,5% e 5,0%, variando a pressão e o ângulo de giro. Este é um parâmetro que representa a compactabilidade.

Pela análise da Figura 3.26, podemos referir que não é um parâmetro que varie muito com a percentagem da mistura, mas de uma forma geral pode-se afirmar que a compactabilidade melhora com o aumento da percentagem de betume. Nos resultados obtidos dos provetes “600 kPa\_50 scale” isto não ocorre. Também se pode concluir que a um menor ângulo usado na compactação, como é o caso dos provetes “600 kPa\_20 scale”, pior a compactabilidade. No que

diz respeito às pressões conclui-se que estas pouca influência exercem sobre a compactabilidade.

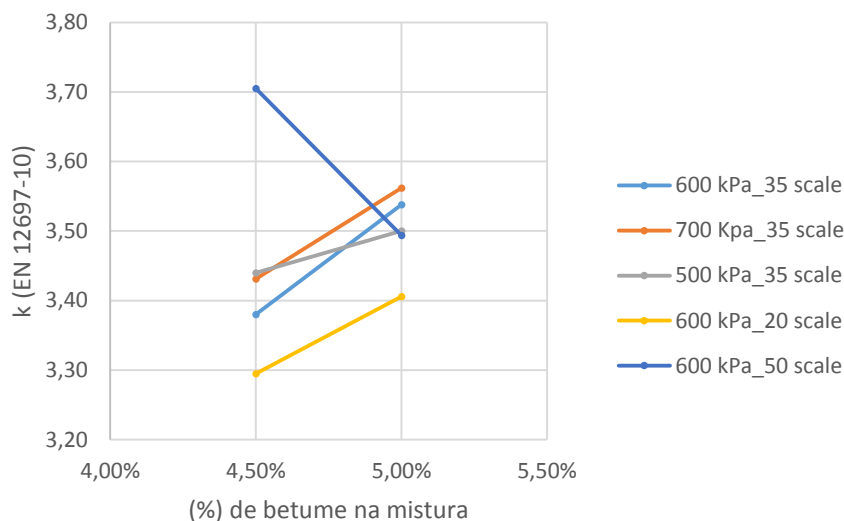


Figura 3.26 - Resultados do parâmetro k para as misturas de 4,5% e 5,0%, variando a pressão e o ângulo de giro.

A Figura 3.27 apresenta o parâmetro  $v(1)$  variando a percentagem de betume, o ângulo e a pressão. Este é um parâmetro que representa a espalhabilidade.

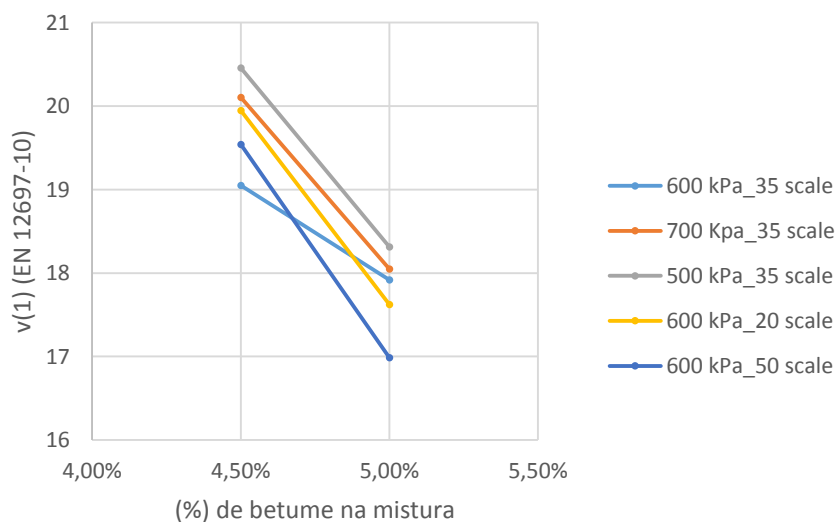


Figura 3.27 - Resultados do parâmetro  $v(1)$  para as misturas de 4,5% e 5,0%, variando as pressões e os ângulos.

Analisando o gráfico da Figura 3.27 pode-se afirmar que o  $v(I)$  diminui com o aumento de percentagem da mistura. O que indica que a espalhabilidade melhora com o aumento da percentagem da mistura. Já para as pressões e ângulos, com valores muito próximos, é pouco conclusivo.

Na Figura 3.28 apresenta-se o parâmetro  $k \times AV$  variando a percentagem de betume, o ângulo e a pressão, que representa a compactabilidade.

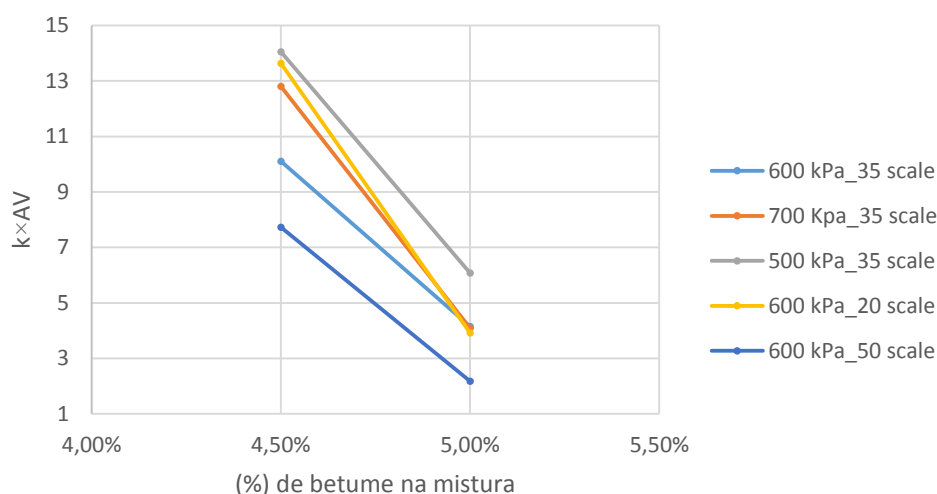


Figura 3.28 - Resultados do parâmetro  $k \times AV$  para as misturas de 4,5% e 5,0%, variando as pressões e ângulos.

Este parâmetro comparativamente com o  $k$  da EN 12697-10 (que também representa a compactabilidade), apresenta resultados mais expressivos no que diz respeito à percentagem de betume da mistura. Avaliando a diferença dos ângulos e pressões em ambas as misturas, pode-se concluir que quanto menor a percentagem de betume, maior o ângulo e maior a pressão (nos provetes “700 kPa\_35 scale” menos explícito), pior será a compactabilidade.

Na Figura 3.29, apresenta-se o primeiro parâmetro energético analisado, variando a percentagem de betume, o ângulo e a pressão. Este é um parâmetro que se obtém através da primeira parte da curva de compactação.

Este parâmetro representa a capacidade e rapidez da mistura em compactar em obra, e pode-se concluir que quanto maior a percentagem de betume maior é o  $WEI$ . No entanto, até um valor mínimo de 4,5 de  $WEI$ , a mistura é considerada com uma boa capacidade e rapidez de compactação em obra. Aqui pode-se concluir que apenas os provetes “600 kPa\_20 scale” e “500 kPa\_35 scale” na mistura de 4,5% não apresentam essa capacidade.

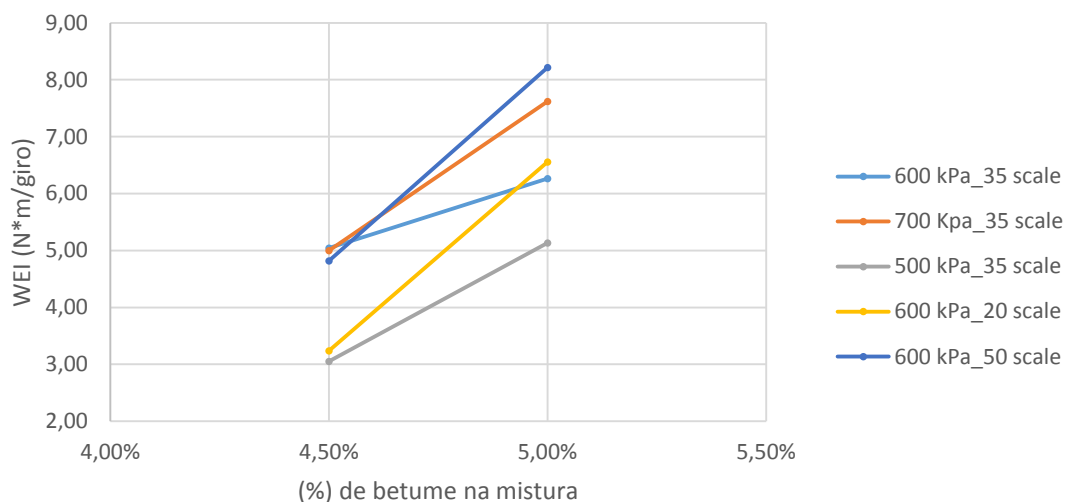


Figura 3.29 - Resultados do parâmetro WEI para as misturas de 4,5% e 5,0%, variando as pressões e ângulos.

A Figura 3.30 apresenta o parâmetro energético *CEI*, variando a percentagem de betume, o ângulo e a pressão. Ao contrário do *WEI*, o *CEI* utiliza o final da curva de compactação.

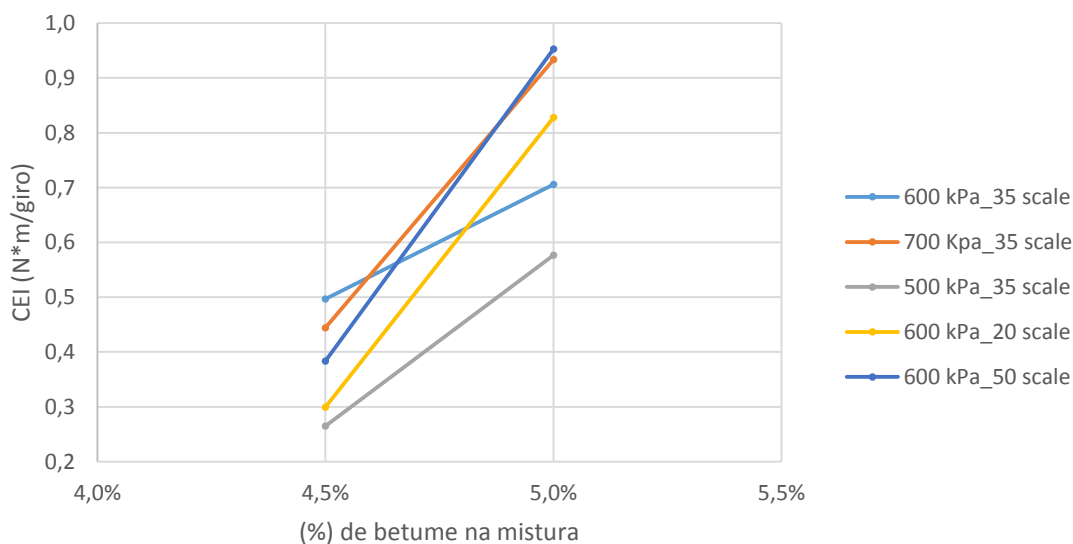


Figura 3.30 - Resultados do parâmetro CEI para as misturas de 4,5% e 5,0%, variando as pressões e ângulos.

Este parâmetro energético é representado pelo fim da curva de compactação e representa a estabilidade após compactação. Tem um valor máximo de 0,5 para uma aceitável estabilidade do pavimento, logo quanto maior o *CEI* pior é a sua resistência. Observando a Figura 3.30, pode

concluir-se que todos os provetes da mistura de 4,5% respeitam esse limite, ao contrário dos provetes da mistura 5,0%. Também se pode observar que quanto maior a pressão e o ângulo interno considerados na compactação, pior será a estabilidade em serviço.

Uma vez calculados os parâmetros de trabalhabilidade, realizou-se a análise estatística. Na Figura 3.31, apresentam-se as *boxplots* por categorias e os *p-values* (em %) das análises de variância (ANOVA). Nas Figuras 3.32, 3.33 e 3.34 pode-se visualizar os resultados dos testes de comparações múltiplas (teste de Tukey) para os parâmetros de trabalhabilidade, cujos resultados se apresentam no Quadro 3.4.

Da análise estatística pode-se concluir que a pressão de compactação tem pouca influência nos parâmetros de trabalhabilidade estudados. Já o impacto do ângulo interno de compactação depende do parâmetro, uma vez que apresenta alguma significância no parâmetro *k* (*p-value* de 5,6%) quando se compara o ângulo 20 scale com o 50 scale e nenhuma significância nos restantes. No que diz respeito à variação da percentagem de betume conclui-se que é o parâmetro que mais afecta a trabalhabilidade da mistura, tendo obtido valores de *p-value* inferiores a 5% no  $v(1)$ , no *WEI*, no *CEI* e *k\*AV*.



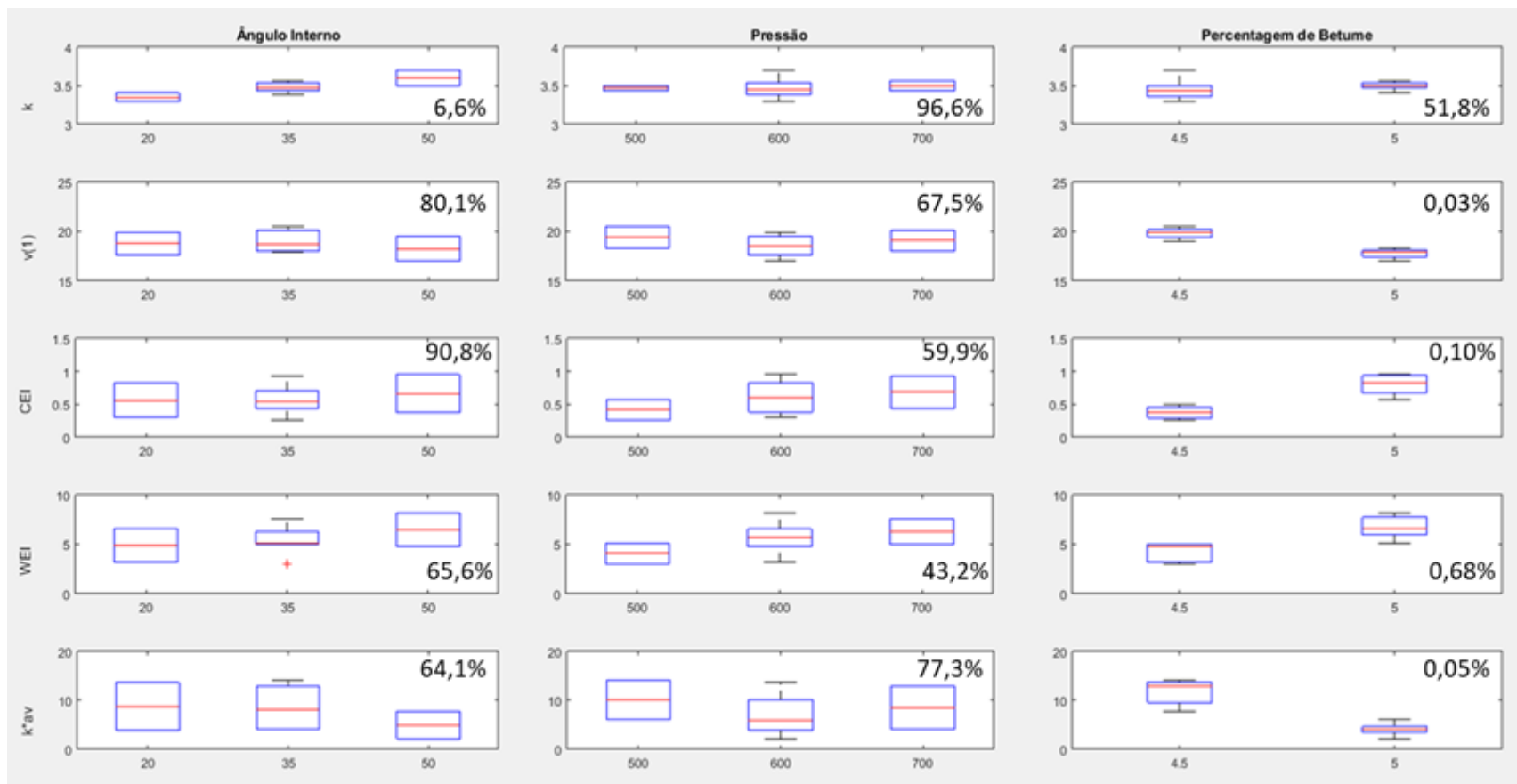


Figura 3.31 – Gráficos *box plot* dos parâmetros de trabalhabilidade por categorias.

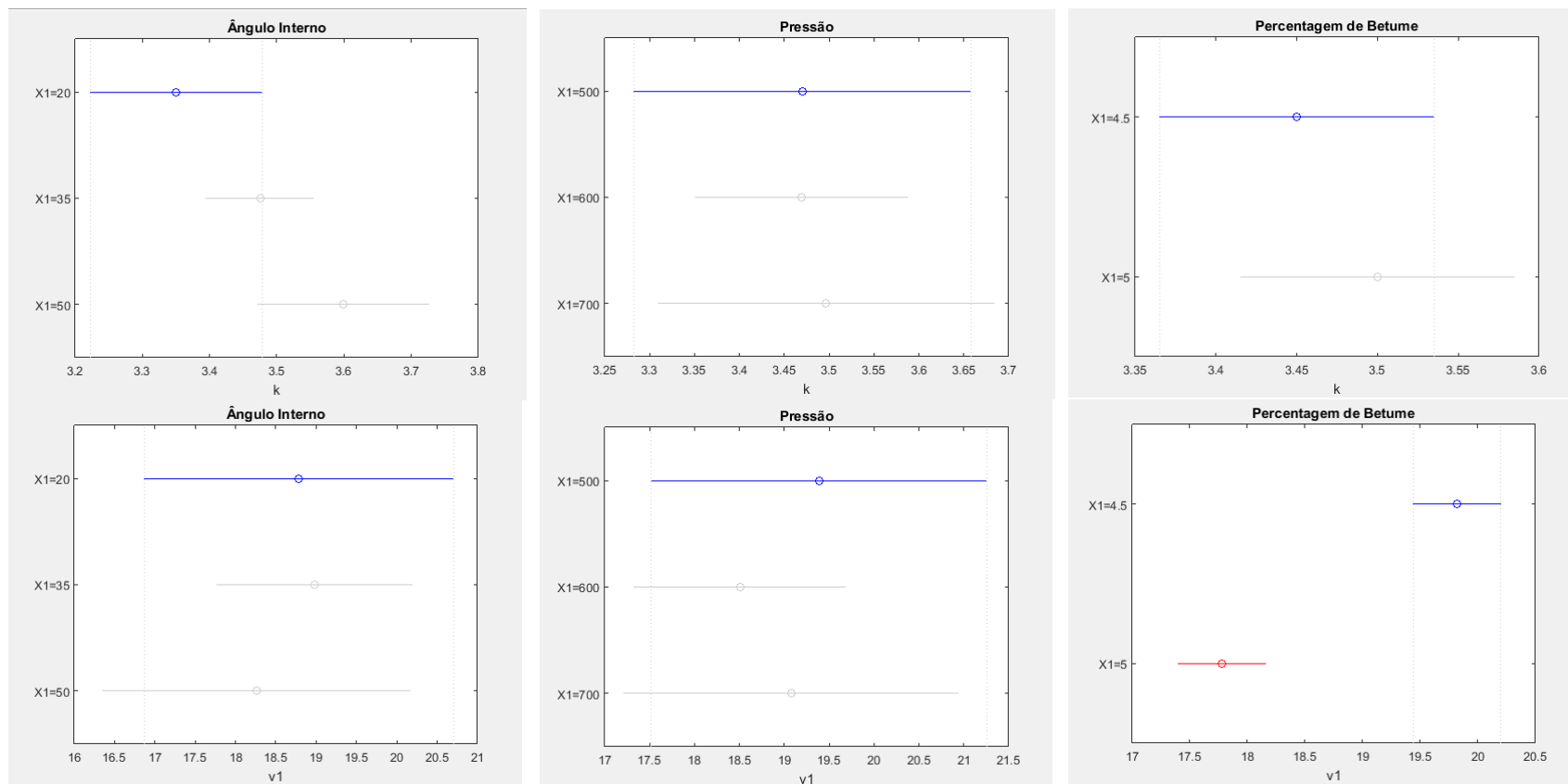


Figura 3.32 - Visualização gráfica dos testes de comparações múltiplas para os parâmetros de trabalhabilidade  $k$  (inclinação da curva de evolução da porosidade) e  $v(1)$  (porosidade da mistura a 1 giro).

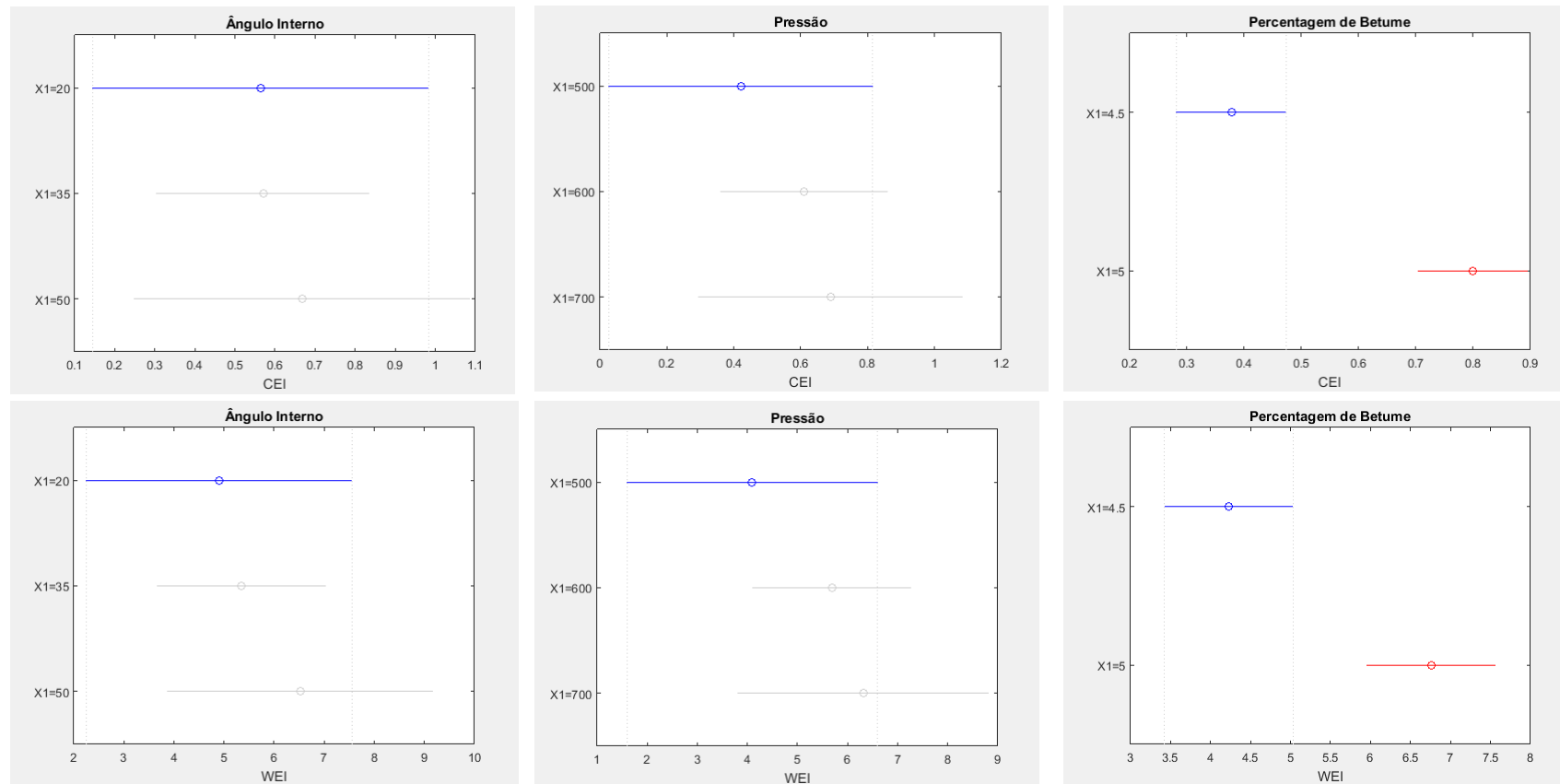


Figura 3.33 - Visualização gráfica dos testes de comparações múltiplas para os parâmetros de trabalhabilidade *CEI* (Compaction Energy Index) e *WEI* (Workability Energy Index).

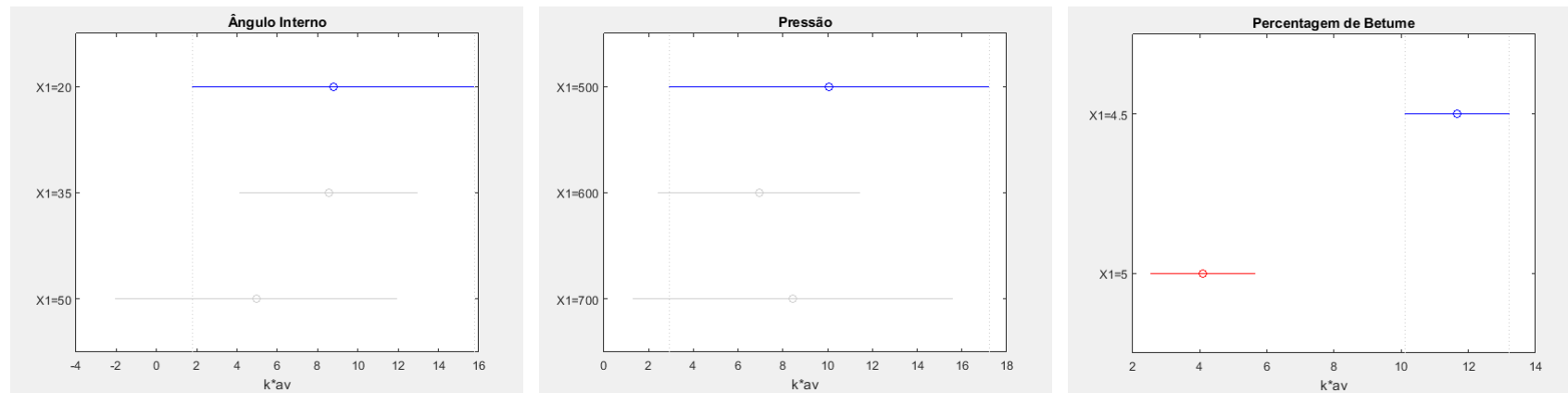


Figura 3.34 - Visualização gráfica dos testes de comparações múltiplas para o parâmetro de trabalhabilidade  $k^*av$  (produto da inclinação da curva de evolução da porosidade pela porosidade a 120 giros).

Quadro 3.7 -Resultados dos testes de comparações múltiplas

		Parâmetro de compactação																	
		Ângulo						Pressão						Porcentagem de betume					
		Grupos		Diferença	Intervalo de confiança 95%		p-value	Grupos		Diferença	Intervalo de confiança 95%		p-value	Grupos		Diferença	Intervalo de confiança 95%		p-value
Trabalhabilidade	k	20 scale	35 scale	-0,3334	-0,1247	0,0841	<b>25,1%</b>	500 kPa	600 kPa	-0,3060	0,0003	0,3067	<b>100,0%</b>	4,5%	5,0%	-0,2197	-0,0498	0,1201	<b>51,8%</b>
		20 scale	50 scale	-0,5047	-0,2490	0,0067	<b>5,6%</b>	500 kPa	700 kPa	-0,4017	-0,0265	0,3487	<b>97,7%</b>	-	-	-	-	-	-
		35 scale	50 scale	-0,3331	-0,1243	0,0844	<b>25,2%</b>	600 kPa	700 kPa	-0,3332	-0,0268	0,2795	<b>96,4%</b>	-	-	-	-	-	-
	v1	20 scale	35 scale	-3,3243	-0,1962	2,9319	<b>98,1%</b>	500 kPa	600 kPa	-2,1774	0,8750	3,9274	<b>68,9%</b>	4,5%	5,0%	1,2756	2,0412	2,8068	<b>0,0%</b>
		20 scale	50 scale	-3,3086	0,5225	4,3536	<b>91,6%</b>	500 kPa	700 kPa	-3,4294	0,3090	4,0474	<b>96,8%</b>	-	-	-	-	-	-
		35 scale	50 scale	-2,4094	0,7187	3,8468	<b>78,4%</b>	600 kPa	700 kPa	-3,6184	-0,5660	2,4864	<b>85,2%</b>	-	-	-	-	-	-
	CEI	20 scale	35 scale	-0,6907	-0,0064	0,6780	<b>100,0%</b>	500 kPa	600 kPa	-0,8352	-0,1902	0,4547	<b>67,5%</b>	4,5%	5,0%	-0,6134	-0,4218	-0,2302	<b>0,1%</b>
		20 scale	50 scale	-0,9425	-0,1044	0,7338	<b>92,9%</b>	500 kPa	700 kPa	-1,0577	-0,2679	0,5220	<b>60,1%</b>	-	-	-	-	-	-
		35 scale	50 scale	-0,7823	-0,0980	0,5863	<b>90,8%</b>	600 kPa	700 kPa	-0,7225	-0,0776	0,5673	<b>93,4%</b>	-	-	-	-	-	-
	WEI	20 scale	35 scale	-4,7948	-0,4553	3,8842	<b>94,9%</b>	500 kPa	600 kPa	-5,6828	-1,5939	2,4949	<b>51,8%</b>	4,5%	5,0%	-4,1373	-2,5273	-0,9173	<b>0,7%</b>
		20 scale	50 scale	-6,9333	-1,6185	3,6963	<b>65,9%</b>	500 kPa	700 kPa	-7,2240	-2,2162	2,7916	<b>43,7%</b>	-	-	-	-	-	-
		35 scale	50 scale	-5,5027	-1,1632	3,1763	<b>72,1%</b>	600 kPa	700 kPa	-4,7111	-0,6223	3,4665	<b>89,7%</b>	-	-	-	-	-	-
	K*av	20 scale	35 scale	-11,2232	0,2234	11,6701	<b>99,8%</b>	500 kPa	600 kPa	-8,5450	3,1181	14,7812	<b>72,2%</b>	4,5%	5,0%	4,4634	7,5786	10,6938	<b>0,1%</b>
		20 scale	50 scale	-10,1952	3,8240	17,8432	<b>71,3%</b>	500 kPa	700 kPa	-12,6646	1,6197	15,9040	<b>94,1%</b>	-	-	-	-	-	-
		35 scale	50 scale	-7,8461	3,6006	15,0472	<b>64,2%</b>	600 kPa	700 kPa	-13,1615	-1,4984	10,1647	<b>92,5%</b>	-	-	-	-	-	-

### **3.8 Considerações finais**

Neste capítulo, onde foram apresentados e discutidos os resultados obtidos em Laboratório, teve como objectivo comparar as misturas compactadas no compactador de impacto com o compactador giratório, bem como analisar a importância dos parâmetros de compactação na trabalhabilidade das misturas.

Na análise feita por compactador, constatou-se valores baixos da porosidade em vários provetes. Inicialmente pensou-se ser devido ao fabrico de apenas 2 provetes por parâmetro. Posteriormente verificou-se que os resultados eram similares, excluindo essa hipótese. No entanto, estes valores podem ser justificados por apenas se ter realizado uma baridade máxima teórica por mistura.

No que diz respeito à comparação entre resultados, como era de esperar, obteve-se misturas mais compactadas para uma percentagem de betume maior, energias de compactação maior, bem como ângulos superiores.

Por fim, e de uma forma geral, pode-se concluir que a trabalhabilidade das misturas betuminosas melhora com o aumento da percentagem de betume, sendo que este é um dos parâmetros que mais afecta esta característica, como podemos concluir pela análise estatística realizada. Ainda pela análise estatística efectuada, também se conclui que o ângulo interno tem influência na trabalhabilidade, dependendo do índice considerado. O que não se verificou com as pressões que pouco influenciaram.

## 4. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Embora ao longo deste trabalho tenham sido feitas análises e conclusões sobre os resultados obtidos, apresentam-se de seguida algumas conclusões gerais e também sugestões de trabalhos futuros.

Nos primeiros capítulos foram realizadas breves apresentações ao tema em questão, iniciando com a constituição de um pavimento, quais as propriedades das misturas betuminosas e como se influenciam, quais os métodos de formulação existentes e apresentando com maior detalhe, os usados nesta dissertação. Ainda neste capítulo, achou-se pertinente incluir um sub-capítulo de um dos equipamentos utilizados na compactação, o compactador giratório, dado o seu pouco uso em Portugal. Por último, mostrou-se a importância da trabalhabilidade nas misturas betuminosas.

No caso de estudo, começou-se por formular a mistura a usar com os devidos ensaios aos materiais obtendo uma curva de mistura dentro dos limites exigidos (EP, 2014). Efectuou-se a calibração do ângulo interno e da altura do compactador giratório, conseguindo desta forma ter resultados mais credíveis. Usando a mesma mistura para ambos, conseguiu-se comparar de igual forma os provetes compactados no compactador de impacto com os provetes realizados com o compactador giratório. Analisando os resultados conclui-se que, com uma energia de compactação superior, com um maior ângulo interno e maiores percentagens de betume obêm-se misturas mais compactas.

Alguns dos provetes compactados no compactador giratório revelaram valores de porosidade baixos, como já mencionado anteriormente, o que pode ser justificado pela única determinação da baridade máxima teórica por mistura, o que pode induzir a erros.

Na análise da trabalhabilidade das misturas, demonstrou-se que a percentagem de betume e o ângulo usado no compactador giratório influenciam esta característica. Foi também possível verificar que as pressões utilizadas (500 kPa, 600 kPa e 700 kPa) não influenciam de forma significativa. Com o intuito de averiguar a influência da pressão, sugere-se novos estudos com um intervalo de pressões diferentes.

Tendo em conta que, a trabalhabilidade de uma forma geral, constitui uma característica que representa a compactabilidade da mistura em obra, que muitas vezes não é executada com as temperaturas devidas, sugere-se também novos estudos da trabalhabilidade variando as temperaturas de compactação.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2004). “Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA)”, AASHTO R 35-04, Association of American State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.

Advanced Asphalt Technologies (2011). “A manual for design of hot mix asphalt with commentary”. Nacional Cooperative Highway Research Program – NCHRP, REPORT 673. Washington, D.C.

Ahmad, J., Yusoff, N., Hainin, M., Rahman, M., Hossain, M. (2014). “Evaluation on Performance Characteristics of Superpave Asphalt Mix Design under Tropical Climatic Conditions.” ISSN 1997-1400 Int. J. Pavement Res. Technol. 7(5): 331-342.

Al-Khateeb, G., Paugh, C., Stuart, K., Harman, T., D’Angelo, J. (2002). “Target and Tolerance Study for the Angle of Gyration Used in the Superpave Gyrotory Compactor (SGC)”, compendium of papers (CD -ROM), Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.

Anderson, R., Turner, P., Peterson, R., Mallick, R. (2002). “Relationship of Superpave Gyrotory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior”, NCHRP Report 478, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington D.C.

Asphalt Institute (1997). “Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types”, MS-2, Sixth Edition, Asphalt Institute, Lexington.

Austroroads (2006). “Introduction to Asphalt Mix Design”, Austroroads Technical Report, Austroroads, Sydney

Branco, F., Pereira, P., Picado Santos, L. (2011). “Pavimentos Rodoviários”, Edições Almedina, Coimbra.

Brown, E., Buchanan, M. (2001). “Literature Review: Verification of Gyration Levels in the Superpave Ndesign Table”, NCHRP Web Document 34, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.



Buchanan, M. S., Brumfield, J., Sheffield, R. (2004). "Investigation of the Gyration Angle of Superpave Gyrotory Compactors". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.16, N. 5, p. 444-451.

Cabrera, J. (1996). "Hot Bituminous Mixtures – Design for Performance, Performance and Durability of Bituminous Materials", *Proceedings of Symposium, University of Leeds, 1996*, Edited by J.G. Cabrera and J.R. Dixon.

Cabrera, J. (1991). "Assessment of the Workability of Bituminous Mixtures", *Journal of Highways and Transportation*, Vol. 11, pp. 17-23, 1991. 3.

CEN (2001). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 10 : Compactability", *European Standard EN 12697-10*, Comité Européen de Normalisation, Brussels.

CEN (2007). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor", *European Standard EN 12697-30*, Comité Européen de Normalisation, Brussels.

CEN (2007). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing", *European Standard EN 12697-35*, Comité Européen de Normalisation, Brussels.

CEN (2007). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens", *European Standard EN 12697-6*, Comité Européen de Normalisation, Brussels.

CEN (2007). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test", *European Standard EN 12697-34*, Comité Européen de Normalisation, Brussels.

CEN (2007). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density", *European Standard EN 12697-5*, Comité Européen de Normalisation, Brussels.

CEN (2007). "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens", *European Standard EN 12697-8*, Comité Européen de Normalisation, Brussels.

Cominsky, R., Huber, J., Kennedy, T., Anderson, R. (1994b). “The SUPERPAVE Mix Design Manual for New Construction and Overlays”, Report SHRP-A-407, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C.

Cominsky, R., Leahy, R., Harrigan, E. (1994a). “Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning”, Report SHRP-A-408, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C.

DelRio-Prat, M., Vega-Zamanillo, M., Calzada-Perez, M., Sanchez-Alonso, E., CastroFresno, D. (2011). “Procedimiento para la Medida de la Compactabilidad de las Mezclas Bituminosas en Laboratorio”, XVI Congreso Ibero-Latinoamericano de Asfalto, 20-25 de novembro, Rio de Janeiro.

Dessouky, S., Pothuganti, A., Walubita F. and Rand D. (2011) “Laboratory Evaluation of the Workability and Compactability of Asphaltic Materials Prior to Road Construction”. Journal of Materials in Civil Engineering.

EP (2014). “Caderno de Encargos Tipo Obra”, Estradas de Portugal, Almada.

Ferreira, A.; Almeida, A. (2015), “Aula 6\_Pavimentos\_de\_Infraestruturas\_2015”. Slides das aulas de Vias de Comunicação 2, Universidade de Coimbra.

Ferreira, A.; Almeida, A. (2015), “Aula 8\_Misturas betuminosas e misturas hidráulicas\_2015”. Slides das aulas de Vias de Comunicação 2, Universidade de Coimbra.

Ferreira, A.; Almeida, A. (2015), “Aula 9\_Formulação de misturas betuminosas\_2015”. Slides das aulas de Vias de Comunicação 2, Universidade de Coimbra.

Fonseca, P. (2011). “Propriedades Volumétricas de Misturas Betuminosas (Com e sem Fibras)”. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

Francisco, A. (2012). “Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis”. Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.

Gardete, D. (2016). “Contribuição para o estabelecimento duma mistura betuminosa adequada para o ciclo de vida através da definição na fase de formulação duma parametrização eficiente”. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa Instituto Superior Técnico.

Gardete, D., Picado-Santos, L. e Capitão, S. (2016). “Avaliação da trabalhabilidade de misturas betuminosas com base nas curvas de Compactação”. 8º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

Guler, M. (2008). “Effects of Mix Design Variables on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 134, No. 3, March, p. 128-136.

Harman, T., Bukowski, J., Moutier, F., Huber, J., Mcgennis, R. (2002). “The History and Future Challenges of Gyratory Compaction 1939 to 2001”, *Transportation Research Record 1789*, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C.

Huber, G. (1996). “Development of the Superpave Gyratory Compactor.” *Heritage Research*. Indianapolis, Indiana.

IPQ (2011). “Misturas betuminosas – Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso”, NP EN 13108-1, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2014). “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração, NP EN 933-1, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2017). “Betumes e ligantes betuminosos - Determinação da penetração com agulha”, NP EN 1426, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

IPQ (2017). “Betumes e ligantes betuminosos - Determinação da temperatura de amolecimento Método do Anel e Bola”, NP EN 1427, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

Leandro, R., Vasconcelos, K., Bernucci, L. (2017). “Evaluation of the laboratory compaction method on the air voids and the mechanical behavior of hot mix asphalt”. *Construction and Building Materials* 156 (2017) 424–434.

McDaniel, R., Leahy, R., Huber, G., Moulthrop, J., Ferragut, T. (2011). “The Superpave Mix Design System: Anatomy of a Research Program”, NCHRP, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Micaelo, R. (2008). “Compactação de misturas betuminosas – Ensaio de campo e modelação numérica”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Muras, A. (2010). “Prediction of Asphalt Mixture Compactability from Mixture, Asphalt, and Aggregate Properties”, Master Thesis, Texas A&M University, College Station.

Pimentel, C. (2013). “Formulação de misturas Betuminosas a quente, contribuição para um novo método de formulação”. Tese de Mestrado, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa.

Prowell, B., Brown, E. (2007). “Superpave Mix Design: “Verifying Gyration Levels in the Ndesign Table”, NCHRP Report 573, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Prowell, B., Brown, E., Huner, M. (2003). “Evaluation of Internal Gyration Angle of Superpave Gyrotory Compactors in Alabama”, NCAT Report 03-04, National Center for Asphalt Technology, Auburn.

Qasim, Z., Abbas, A. (2017). “Effect of Filler Content on Properties of Asphaltic Mixtures for Marshall and Superpave Gyrotory Compactor”. Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES) Vol.20 No.1, 2017 pp.183 – 193.

Silva, A. (2014). “Formulação de misturas betuminosas a quente: análise comparativa da aplicação de métodos empíricos e volumétricos”. Tese de Mestrado, ISEC, Coimbra.

TRB (2005). “SUPERPAVE – Performance by Design - Final Report of the TRB Superpave Committee”, Transportation Research Board, Washington, D.C.

TxDOT (2010). “Test Procedure for superpave gyrotory compacting of test specimens of bituminous mixtures”, Tex-241-F, Texas Department of Transportation, Austin.

@infraestruturasdeportugal (2018). <http://www.infraestruturasdeportugal.pt/rede/rodoviaria>. Infraestruturas de Portugal. Visto a 30/08/2018.

## 6. ANEXOS

### Anexo A – Ficha de produto

#### DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO

#### BRITA 2



N.º DD.09

- Código de identificação único do produto-tipo:**  
202
- Tipo, lote ou número da série, ou quaisquer outros elementos que permitam a identificação do produto de construção, nos termos do nº 4 do artigo 11º:**  
Brita 2  
(Agregado grosso obtido por britagem de rocha calcária da pedreira de Chão Queimado, instalação TZB e instalação MB)
- Utilização ou utilizações previstas do produto de construção, de acordo com a especificação técnica harmonizada aplicável, tal como previsto pelo fabricante:**  
Betão para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil;  
Misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação, excepto camadas de desgaste
- Nome, designação comercial ou marca comercial registada e endereço de contacto do fabricante, nos termos do nº 5 do artigo 11º:**  
SICOBRITA – Extração e Britagem de Pedra, SA  
Rua de Santa Luzia, n.º 22, 3º Piso, Salas 32 e 33  
Edifício Pombal Shopping  
3100-483 POMBAL
- Sistema ou sistemas de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto de construção tal como previsto no anexo V:**  
Sistema 2+
- No caso de uma declaração de desempenho relativa a um produto de construção abrangido por uma norma harmonizada:**  
A EIC – Empresa Internacional de Certificação, Lda, organismo de certificação notificado com o nº 1515, realizou a inspeção inicial da unidade fabril e do controlo da produção em fábrica, executa o acompanhamento, apreciação e aprovação contínuos do controlo da produção em fábrica, no âmbito do sistema 2+, e emitiu em 27 de Novembro de 2007 o certificado de conformidade n.º 1515-CPR-0191, cuja última edição data de 05 de Março de 2014.

#### 7. Desempenho Declarado

CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS	NORMAS HARMONIZADAS	
	EN 12620:2002 +A1:2008	EN 13043:2002 +AC:2004
Dimensão nominal	11/22	
Granulometria	G <sub>85</sub> /20	G <sub>85</sub> /20; G <sub>98</sub>
Teor de finos	f <sub>1,5</sub>	f <sub>1</sub>
Cloretos solúveis em água <sup>(1)</sup>	< 0,001%	NA
Sulfatos solúveis em ácido <sup>(1)</sup>	AS <sub>0,2</sub>	NA
Enxofre total <sup>(1)</sup>	< 0,04%	NA
Teor de húmus <sup>(1)</sup>	Mais claro	NA
Contaminantes orgânicos leves	NPD	NA
Retração por secagem <sup>(1)</sup>	0,030%	NA
Massa volúmica <sup>(1)</sup>	Material impermeável	(2,72 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>
	Partículas secas em estufa	(2,66 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>
	Partículas saturadas	(2,68 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>
Absorção de água <sup>(1)</sup>	(0,9 ± 0,5) %	
Reactividade álcalis-silica	Classe I	NA
Índice de achatamento	FI <sub>15</sub>	FI <sub>10</sub>
% de superfícies esmagadas e partidas	NA	C <sub>100/0</sub>
Resistência à fragmentação	LA <sub>35</sub>	
Resistência ao desgaste por atrito	M <sub>02</sub> 15	
Resistência ao polimento	NPD	
Resistência à abrasão	NPD	
Durabilidade face ao choque térmico <sup>(1)</sup>	NA	V <sub>1A</sub> =1; I=0,4
Afinidade aos ligantes betuminosos	NA	NPD
Durabilidade face ao gelo-degelo <sup>(1)</sup>	MS <sub>18</sub>	
Substâncias perigosas	NPD	

GRANULOMETRIA DECLARADA		
Peneiro (mm)	Passados (%)	Limites (%)
63	100	
45	100	100
31,5	100	98-100
22,4	99	85-100
16	38	
11,2	2	0-20
8	1	
5,6	1	0-5
4	1	
2	1	
1	1	
0,5	1	
0,25	1	
0,125	1	
0,063	0,5	0,0-1,0

Abreviaturas:

NA – Não aplicável;  
NPD – Desempenho não determinado.

Nota:

<sup>(1)</sup> Desempenho determinado noutro produto com a mesma origem.

- O desempenho do produto identificado nos pontos 1 e 2 é conforme com o desempenho declarado no ponto 7. A presente declaração de desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado no ponto 4.

Assinado por e em nome do fabricante por Armando José Sanfins Reis Vieira, Responsável pelo Controlo da Produção em Fábrica.

Pombal, 20 de Agosto de 2014

*Armando José Sanfins Reis Vieira*  
SICOBRITA - Extração e Britagem de Pedra, S.A.  
N.º 511 272 276  
Pedreira Tel. 236 922 951 - Fax 236 922 214  
Escrit. R. Santa Luzia, nº 22-3º Piso, salas 32 e 33  
Edifício Pombal Shopping - 3100-483 Pombal



Edição 1  
Página 1 de 1

## DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO

## BRITA 1 TZB



N.º DD.07

- Código de identificação único do produto-tipo:**  
201
- Tipo, lote ou número da série, ou quaisquer outros elementos que permitam a identificação do produto de construção, nos termos do nº 4 do artigo 11º:**  
Brita 1  
(Agregado grosso obtido por britagem de rocha calcária da pedra de Chão Queimado, instalação TZB)
- Utilização ou utilizações previstas do produto de construção, de acordo com a especificação técnica harmonizada aplicável, tal como previsto pelo fabricante:**  
Betão para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil; Misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação, excepto camadas de desgaste
- Nome, designação comercial ou marca comercial registada e endereço de contacto do fabricante, nos termos do nº 5 do artigo 11º:**  
SICOBRIITA – Extração e Britagem de Pedra, SA  
Rua de Santa Luzia, n.º 22, 3º Piso, Salas 32 e 33  
Edifício Pombal Shopping  
3100-483 POMBAL
- Sistema ou sistemas de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto de construção tal como previsto no anexo V:**  
Sistema 2+
- No caso de uma declaração de desempenho relativa a um produto de construção abrangido por uma norma harmonizada:**  
A EIC – Empresa Internacional de Certificação, Lda, organismo de certificação notificado com o nº 1515, realizou a inspecção inicial da unidade fabril e do controlo da produção em fábrica, executa o acompanhamento, apreciação e aprovação contínuos do controlo da produção em fábrica, no âmbito do sistema 2+, e emitiu em 27 de Novembro de 2007 o certificado de conformidade n.º 1515-CPR-0191, cuja última edição data de 05 de Março de 2014.

## 7. Desempenho Declarado

CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS	NORMAS HARMONIZADAS	
	EN 12620:2002 +A1:2008	EN 13043:2002 +AC:2004
Dimensão nominal	6/14	
Granulometria	G <sub>0,90/15</sub> ; G <sub>1,15</sub>	G <sub>0,90/15</sub> ; G <sub>2,5/15</sub>
Teor de finos	f <sub>1,5</sub>	f <sub>1</sub>
Cloretos solúveis em água <sup>(1)</sup>	< 0,001%	NA
Sulfatos solúveis em ácido <sup>(1)</sup>	AS <sub>0,2</sub>	NA
Enxofre total <sup>(1)</sup>	< 0,04%	NA
Teor de húmus <sup>(1)</sup>	Mais claro	NA
Contaminantes orgânicos leves	NPD	NA
Retração por secagem <sup>(1)</sup>	0,030%	NA
Massa volumica <sup>(1)</sup>	Material impermeável	(2,72 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>
	Partículas secas em estufa	(2,66 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>
	Partículas saturadas	(2,68 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>
Absorção de água <sup>(1)</sup>	(0,9 ± 0,5) %	
Reactividade álcalis-silica	Classe I	NA
Índice de achatamento	FI <sub>15</sub>	
% de superfícies esmagadas e partidas	NA	C <sub>100/0</sub>
Resistência à fragmentação <sup>(1)</sup>	LA <sub>35</sub>	
Resistência ao desgaste por atrito <sup>(1)</sup>	MD <sub>15</sub>	
Resistência ao polimento	NPD	
Resistência à abrasão	NPD	
Durabilidade face ao choque térmico <sup>(1)</sup>	NA	V <sub>1A</sub> =1; I=0,4
Afinidade aos ligantes betuminosos	NPD	
Durabilidade face ao gelo-degelo <sup>(1)</sup>	MS <sub>18</sub>	
Substâncias perigosas	NPD	

GRANULOMETRIA DECLARADA		
Peneiro (mm)	Passados (%)	Limites (%)
63	100	
31,5	100	100
20	100	98-100
16	100	
14	98	90-100
12,5	88	
10	47	32-62
8	13	
6,3	2	0-15
4	1	0-5
2	1	
1	1	
0,5	1	
0,25	1	
0,125	1	
0,063	0,6	0,0-1,0

Abreviaturas:

NA – Não aplicável;  
NPD – Desempenho não determinado.

Nota:

<sup>(1)</sup> Desempenho determinado noutro produto com a mesma origem.

- O desempenho do produto identificado nos pontos 1 e 2 é conforme com o desempenho declarado no ponto 7. A presente declaração de desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado no ponto 4.

Assinado por e em nome do fabricante por Armando José Sanfins Reis Vieira, Responsável pelo Controlo da Produção em Fábrica.

Pombal, 20 de Agosto de 2014

SICOBRIITA - Extração e Britagem de Pedra, SA.  
 N.º 501 222 026  
 Pedreira: Tel. 236 922 951 - Fax 236 922 214  
 Escrit.: R. Santa Luzia, nº 22-3º piso, salas 32 e 33  
 Edifício Pombal Shopping - 3100-483 Pombal

Edição 1  
Página 1 de 1

## DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO

## AREIA GROSSA



N.º DD.02

1. Código de identificação único do produto-tipo:  
801
2. Tipo, lote ou número da série, ou quaisquer outros elementos que permitam a identificação do produto de construção, nos termos do nº 4 do artigo 11º:  
Areia Grossa  
(Agregado grosso obtido por britagem de rocha calcária da pedra de Chão Queimado, instalação TZB e instalação de lavagem)
3. Utilização ou utilizações previstas do produto de construção, de acordo com a especificação técnica harmonizada aplicável, tal como previsto pelo fabricante:  
Betão e argamassas para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil
4. Nome, designação comercial ou marca comercial registada e endereço de contacto do fabricante, nos termos do nº 5 do artigo 11º:  
SICOBRITA – Extração e Britagem de Pedra, SA  
Rua de Santa Luzia, n.º 22, 3º Piso, Salas 32 e 33  
Edifício Pombal Shopping  
3100-483 POMBAL
5. Sistema ou sistemas de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto de construção tal como previsto no anexo V:  
Sistema 2+
6. No caso de uma declaração de desempenho relativa a um produto de construção abrangido por uma norma harmonizada:  
A EIC – Empresa Internacional de Certificação, Lda, organismo de certificação notificado com o nº 1515, realizou a inspeção inicial da unidade fabril e do controlo da produção em fábrica, executa o acompanhamento, apreciação e aprovação contínuos do controlo da produção em fábrica, no âmbito do sistema 2+, e emitiu em 27 de Novembro de 2007 o certificado de conformidade n.º 1515-CPR-0191, cuja última edição data de 05 de Março de 2014.

## 7. Desempenho Declarado

CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS	NORMAS HARMONIZADAS		GRANULOMETRIA DECLARADA		
	EN 12620:2002 +A1:2008	EN 13139:2002 +AC/2004	Peneiro (mm)	Passados (%)	Limites (%)
Dimensão nominal	2/5		63	100	
Granulometria	G <sub>c</sub> 85/20	NA	45	100	
Teor de finos	f <sub>3</sub>	Categoria 1	31,5	100	
Qualidade dos finos	NA (teor de finos ≤ 3%)		22,4	100	
Cloretos solúveis em água <sup>(1)</sup>	< 0,001%		16	100	
Sulfatos solúveis em ácido <sup>(1)</sup>	AS <sub>0,2</sub>		11,2	100	100
Enxofre total <sup>(1)</sup>	< 0,04%		8	100	98-100
Teor de húmus <sup>(1)</sup>	Mais claro		5,6	100	85-100
Contaminantes orgânicos leves <sup>(1)</sup>	< 0,1%	NA	4	88	
Teor de carbonato	NPD	NA	2	10	0-20
Retração por secagem <sup>(1)</sup>	0,030%	NA	1	1	0-5
Massa volumétrica <sup>(1)</sup>	Material impermeável	(2,71 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>	0,5	0	
	Partículas secas em estufa	(2,65 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>	0,25	0	
	Partículas saturadas	(2,67 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>	0,125	0	
Absorção de água <sup>(1)</sup>	(0,9 ± 0,5) %		0,063	0,3	0,0-3,0
Reactividade álcalis-silica	Classe I				
Substâncias perigosas	NPD				

Abreviaturas:  
NA – Não aplicável;  
NPD – Desempenho não determinado.

Nota:  
<sup>(1)</sup> Desempenho determinado noutro produto com a mesma origem.

8. O desempenho do produto identificado nos pontos 1 e 2 é conforme com o desempenho declarado no ponto 7.  
A presente declaração de desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado no ponto 4.

Assinado por e em nome do fabricante por Armando José Sanfins Reis Vieira, Responsável pelo Controlo da Produção em Fábrica.

Pombal, 20 de Agosto de 2014

SICOBRITA - Extração e Britagem de Pedra, S.A.  
C.º nº 501 377 676  
Pedreira, Tel: 221 922 9511 Fax: 226 932 214  
Escrit.: R. Santa Luzia, nº 22-3º piso, salas 32 e 33  
Edifício Pombal Shopping - 3100-483 Pombal



05

Edição 1  
Página 1 de 1

## DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO

## PÓ GRAVILHADO



N.º DD.04

- Código de identificação único do produto-tipo:**  
300
- Tipo, lote ou número da série, ou quaisquer outros elementos que permitam a identificação do produto de construção, nos termos do nº 4 do artigo 11º:**  
**Pó Gravilhado**  
(Agregado fino (EN 12620; EN 13242) / agregado de granulometria extensa (EN 13043) obtido por britagem de rocha calcária da pedreira de Chão Queimado, instalação MB)
- Utilização ou utilizações previstas do produto de construção, de acordo com a especificação técnica harmonizada aplicável, tal como previsto pelo fabricante:**  
Betão para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil;  
Materiais tratados com ligantes hidráulicos e materiais não tratados para utilização em engenharia civil e construção de estradas;  
Misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação
- Nome, designação comercial ou marca comercial registada e endereço de contacto do fabricante, nos termos do nº 5 do artigo 11º:**  
SICOBRITE – Extracção e Britagem de Pedra, SA  
Rua de Santa Luzia, n.º 22, 3º Piso, Salas 32 e 33  
Edifício Pombal Shopping  
3100-483 POMBAL
- Sistema ou sistemas de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto de construção tal como previsto no anexo V:**  
Sistema 2+
- No caso de uma declaração de desempenho relativa a um produto de construção abrangido por uma norma harmonizada:**  
A EIC – Empresa Internacional de Certificação, Lda, organismo de certificação notificado com o nº 1515, realizou a inspeção inicial da unidade fabril e do controlo da produção em fábrica, executa o acompanhamento, apreciação e aprovação contínuos do controlo da produção em fábrica, no âmbito do sistema 2+, e emitiu em 27 de Novembro de 2007 o certificado de conformidade n.º 1515-CPR-0191, cuja última edição data de 05 de Março de 2014.

## 7. Desempenho Declarado

CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS	NORMAS HARMONIZADAS			
	EN 12620:2002 +A1:2008	EN 13242:2002 +A1:2007	EN 13043:2002 +AC:2004	
Dimensão nominal	0/4			
Granulometria	G <sub>r</sub> 85	G <sub>r</sub> 85; G <sub>T</sub> 20	G <sub>r</sub> 90; G <sub>T</sub> 20	
Teor de finos	f <sub>16</sub>			
Qualidade dos finos: Azul de Metileno	MB < 2,0			
Finos	Azul de Metileno	NA	NA	MB,NR
	Vazios do filer (Rigden)	NA	NA	NPD
	Variacão da temp. anel e bola	NA	NA	NPD
Cloretos solúveis em água <sup>(1)</sup>	< 0,001%	NA	NA	
Sulfatos solúveis em ácido <sup>(1)</sup>	AS <sub>0,2</sub>	AS <sub>0,2</sub>	NA	
Enxofre total <sup>(1)</sup>	< 0,04%	S <sub>1</sub>	NA	
Teor de húmus <sup>(1)</sup>	Mais claro	Mais claro	NA	
Contaminantes orgânicos leves	NPD	NA	NA	
Teor de carbonato	NPD	NA	NA	
Retracção por secagem <sup>(1)</sup>	0,030%	NA	NA	
Massa volumica <sup>(1)</sup>	Material impermeável	(2,71 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>		
	Partículas secas em estufa	(2,65 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>		
	Partículas saturadas	(2,67 ± 0,05) Mg/m <sup>3</sup>		
Absorção de água <sup>(1)</sup>	(0,9 ± 0,5) %			
Reactividade álcalis-silica	Classe I	NA	NA	
Substâncias perigosas	NPD			

GRANULOMETRIA DECLARADA		
Peneiro (mm)	Passados (%)	Limites (%)
63	100	
31,5	100	
22,4	100	
16	100	
11,2	100	
8	100	100
5,6	100	98-100
4	95	90-100
2	68	48-88
1	40	20-60
0,5	25	
0,25	16	0-36
0,125	12	
0,063	9,4	6,4-12,4

Abreviaturas:  
NA – Não aplicável;  
NPD – Desempenho não determinado.

Nota:  
<sup>(1)</sup> Desempenho determinado noutro produto com a mesma origem.

- O desempenho do produto identificado nos pontos 1 e 2 é conforme com o desempenho declarado no ponto 7.  
A presente declaração de desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado no ponto 4.

Assinado por e em nome do fabricante por Armando José Sanfins Reis Vieira, Responsável pelo Controlo da Produção em Fábrica.

Pombal, 20 de Agosto de 2014

*Armando José Sanfins Reis Vieira*  
SICOBRITE - Extracção e Britagem de Pedra, SA  
N.º 51 21 476  
Tel.: 230 922 931 - Fax: 230 922 214  
Escrit.: R. Santa Luzia, n.º 22-3º piso, salas 32 e 33  
Edifício Pombal Shopping - 3100 483 Pombal



05

Edição 1  
Página 1 de 1



**Anexo B – Dados dos provetes compactados**

Quadro B.1 - Baridades e alturas dos ensaios realizados com o compactador de impacto.

Provete	Nº Pancadas	Altura (mm)	Baridade ( $kg/m^3$ )	Média das baridades ( $kg/m^3$ )
4.5_1	50	64,8	2389,7	2388,5
4.5_2		63,7	2381,0	
4.5_3		64,2	2394,6	
4.5_1	70	62,6	2419,0	2413,0
4.5_2		63,6	2412,0	
4.5_3		62,8	2407,9	
5.0_1	50	62,7	2406,0	2406,6
5.0_2		63,5	2407,2	
5.0_3		-	-	
5.0_1	70	63,6	2414,2	2411,5
5.0_2		63,1	2409,6	
5.0_3		63,7	2410,7	

Nota: O provete 5.0\_3 não irá entrar na análise por erros cometidos na compactação.

Quadro B.2 – Baridades e alturas dos ensaios realizados com o compactador giratório.

Provete	Percentagem de betume (%)	Pressão (kPa)	Ângulo (scale)	Baridade ( $kg/m^3$ )	Altura (mm)	AlturaCG (mm)
1.1	4,5			2432,4	107,0	107,6
1.2				2436,5	107,3	107,5
2.1	5,0		(0,96°)	2450,6	103,3	104,6
2.2				2445,7	103,3	104,5
3.1	4,5	600	50	2459,5	105,3	108,2
3.2				2453,2	104,7	106,0
4.1	5,0		(1,19°)	2464,4	104,3	105,3
4.2				2459,6	104,0	104,9
5.1	4,5			2413,6	109,0	109,8
5.2				2396,4	107,8	108,9
6.1	5,0		(0,87°)	2450,3	105,8	106,2
6.2				2447,4	104,7	105,9
7.1	4,5	500		2405,9	109,2	110,1
7.2				2406,9	109,3	110,1
8.1	5,0		35	2432,6	106,0	106,8
8.2				2435,8	106,0	106,7
9.1	4,5		(0,96°)	2424,0	109,2	109,6
9.2				2407,4	108,5	109,0
10.1	5,0	700		2454,7	105,0	105,7
10.2				2442,9	103,0	104,0