



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

Desenvolvimento de misturas betuminosas porosas impregnadas com geopolímeros

Maria Ana Abreu Dias da Silva Carloto

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil: Estruturas e Construção
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor João Paulo Castro Gomes

Covilhã, Outubro de 2011

“Se não houver frutos, valeu a beleza das flores.

Se não houver flores, valeu a sombra das folhas.

Se não houver folhas, valeu a intenção da semente.

O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza dos seus sonhos”

Eleanor Roosevelt

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor João Paulo de Castro Gomes, orientador científico do trabalho, pela disponibilidade e pelo constante estímulo, acompanhamento e incentivo demonstrado na orientação deste trabalho.

À Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida, agradeço a constante disponibilidade e compreensão e pela transmissão de conhecimentos e ajuda prestada no desenvolvimento da parte laboratorial do trabalho.

À LUSASFAL, pelo betume disponibilizado.

Aos Técnicos do Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da Universidade da Beira Interior, pela disponibilidade e apoio prestado na execução dos trabalhos práticos.

Ao Luís Vaz, investigador da Universidade da Beira Interior, pelos conhecimentos transmitidos e pela ajuda prestada na concepção dos ligantes geopoliméricos.

Aos colegas e, acima de tudo, amigos Lara, Filipe, Carlos, Bruno e Nuno, pela amizade e apoio ao longo de todos estes anos.

À minha família e aos amigos, pelo apoio incondicional e pelo encorajamento que sempre me transmitiram ao longo de todo o percurso académico.

Às minhas primas e princesas, Francisca, Carlota e Joana, pelo carinho e momentos de diversão.

Não tenho como agradecer aos meus pais, António José e Maria do Céu, que sempre me apoiaram e me proporcionaram todas as condições para atingir os meus objectivos, por todos os ensinamentos da vida.

Finalmente, um agradecimento especial ao Ricardo, pela dedicação, incentivo, compreensão e, fundamentalmente, por estar sempre presente.

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um estudo laboratorial de misturas betuminosas porosas impregnadas com cimento e com ligante geopolimérico. O estudo desenvolvido visa o conhecimento da composição e das propriedades principais deste tipo de misturas.

O contributo apresentado neste trabalho insere-se na área do conhecimento sobre pavimentos semi-flexíveis porosos impregnados com cimento Portland. Como se sabe, as misturas porosas impregnadas com cimento têm aplicação em pavimentos sujeitos a elevadas solicitações de carga e desgaste, sendo a sua utilização mais comum em zonas industriais, portos, aeroportos, estradas, áreas de estacionamento de tráfego pesado e hangares.

Como inovação, e em alternativa ao cimento Portland, foram produzidas misturas porosas impregnadas com ligantes geopoliméricos, obtidos a partir de lamas residuais provenientes de uma mina de tungsténio. Assim, a parte experimental consistiu na produção em laboratório de misturas betuminosas impregnadas com pastas de cimento Portland e de ligantes geopoliméricos. Inicialmente foi desenvolvida uma mistura betuminosa porosa com 25% de porosidade aberta, combinando agregados de diferentes granulometrias e diferentes teores de betume. As características mecânicas da mistura betuminosa porosa foram determinadas pelo ensaio Cântabro. A fluidez das pastas de cimento Portland e de ligantes geopoliméricos foi determinada pelo Cone de Marsh. As propriedades das misturas porosas impregnadas com cimento e geopolímeros foram caracterizadas com a realização de ensaios de tracção indirecta e de compressão simples.

Da análise dos resultados obtidos, tendo em conta as condições deste estudo, não se pode concluir que a impregnação com ligantes geopoliméricos seja vantajosa comparativamente à utilização de cimento Portland. No entanto, verifica-se que existe um grande potencial para a utilização de ligantes alternativos ao cimento Portland, como o caso dos geopolímeros obtidos a partir de resíduos de minas, com vantagens ambientais e económicas.

ABSTRACT

This work presents a laboratory study of porous bituminous mixes impregnated with cement and geopolymers grouts. The study is aimed at the knowledge of the composition and main properties of this type of mixtures.

The contribution presented in this paper is part of the area of knowledge of semi-flexible pavements impregnated with Portland cement (grouted macadams). As is well known the grouted macadams have application in asphalt pavements subject to high load traffic and the most common application fields are industrial areas, harbors, airports, roads and parking areas of heavy traffic and also hangars.

As an innovation and as an alternative to Portland cement, were produced porous mixtures impregnated with geopolymer binders obtained from mud waste from a local tungsten mine. Thus, the experimental part was the production in laboratory of bituminous mixtures impregnated with cement Portland grouts and geopolymer binders. Initially we developed porous asphalt with 25% of voids combined with different gradations aggregates and different bitumen contents. The mechanical properties of porous asphalt were determined using the Los Angeles abrasion (Cantabro test). The fluidity of the grouts was determined by March Cone. The properties of semi-flexible bituminous mixes impregnated with cement and geopolymers were characterized using Indirect Tensile tests and Simple Compression tests.

From the analysis of the results, according to this study conditions, it is not possible to conclude that the impregnation with geopolymer binders is advantageous compared to using Portland cement. However, it appears that there is a great potential for the use of alternative grouts to Portland cement as the case of geopolymers made from mining waste, with environmental and economic advantages.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Índice	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Quadros	xv
Lista de Abreviaturas e Símbolos.....	xvii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – Enquadramento	2
1.2 – Objectivos	3
1.3 – Conteúdo da dissertação e metodologia	4
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 – Pavimentos semi-flexíveis	6
2.1.1 – Introdução	6
2.1.2 – Aplicação.....	7
2.1.3 – Constituição	8
2.1.4 – Propriedades	9
2.1.5 – Características dos materiais.....	10
2.2 – Ligantes geopoliméricos	22
CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	25
3.1 – Introdução	26
3.2 – Características dos materiais	26
3.3 – Caracterização da mistura betuminosa porosa	29
3.3.1 – Granulometria	29
3.3.2 – Determinação da percentagem de betume	30
3.3.3 – Fabricação e compactação dos corpos de prova	31
3.3.4– Porosidade	34

3.3.5– Ensaio Cantabro	35
3.3.6– Compressão diametral	37
3.3.7– Baridade	38
3.4 – Caracterização das argamassas	39
3.4.1 – Argamassa de cimento	40
3.4.1 – Argamassa geopolimérica	43
3.6 – Características das misturas betuminosas impregnadas	45
3.6.1 – Produção de misturas impregnadas	45
3.6.2 – Ensaio de tracção indirecta.....	49
3.6.3 – Ensaio de compressão.....	52
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	55
4.1 – Considerações finais	56
4.2 – Conclusões	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
ACERVO NORMATIVO	61
Anexos.....	62
Granulometria da mistura betuminosa M10_90.....	63
Granulometria da mistura betuminosa M100.....	64
Granulometria da mistura betuminosa M80_20.....	65
Granulometria da mistura betuminosa M70_30.....	66
Granulometria da mistura betuminosa M30_25_45.....	67
Porosidade	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Carote retirado de um pavimento semi-flexível (Densit, 2000).....	7
Figura 2: Estrutura típica de uma camada de mistura porosa impregnada com cimento	8
Figura 3: Cone de Marsh (Anderton, 2000)	11
Figura 4: Módulo de rigidez do Hardicrete em função da temperatura (Boundy, 1979).....	13
Figura 5: Efeito da calda no módulo de rigidez em tracção indirecta (ISTM), aos 28 dias, a diferentes temperaturas (Setyawan, 2003)	17
Figura 6: Efeito do tipo de betume no módulo de rigidez em tracção indirecta, a diferentes idades de cura (Setyawan, 2003)	18
Figura 7: Efeito do tipo de betume no módulo de rigidez em tracção indirecta a diferentes temperaturas de ensaio (Setyawan, 2003)	19
Figura 8: Curvas granulométricas das britas 3/6, 6/15 e 15/25	27
Figura 9: Curvas granulométricas das misturas.....	29
Figura 10: Moldes utilizados para a preparação dos corpos de prova Marshall	32
Figura 11: Mistura manual do corpo de prova	32
Figura 12: Compactador Marshall	33
Figura 13: Corpos de prova no molde após compactação	33
Figura 14: Máquina de desgaste de Los Angeles.....	35
Figura 15: Corpos de prova após ensaio Cantabro	36
Figura 16: Representação do ensaio de tracção indirecta ou compressão diametral.....	37
Figura 17: Corpo de prova antes e depois da selagem	38
Figura 18: Representação do método do Cone de Marsh.....	41
Figura 19: Materiais utilizados na argamassa geopolimérica	43
Figura 20: Ensaio do Cone de Marsh para argamassa geopolimérica.....	44
Figura 21: Ensaio de compressão.....	45
Figura 22: Curva granulométrica da mistura M100.....	46
Figura 23: Execução de uma laje de mistura betuminosa	47
Figura 24: Pormenor da impregnação e do aspecto final da laje preenchida com argamassa de cimento (GM-CIM).....	47
Figura 25: Pormenor da impregnação e do aspecto final da laje preenchida com argamassa geopolimérica (GM-GEO).....	48

Figura 26: Pormenor dos provetes.....	48
Figura 27: Esquema representativo do ensaio de tracção indirecta (ICE Manuals).....	49
Figura 28: Ensaio de compressão diametral.....	50
Figura 29: Pormenor do ensaio GM-CIM.....	51
Figura 30:Pormenor do ensaio GM-GEO.....	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características dos vários tipos de pavimentos (adaptado de Setyawan, 2003)	6
Quadro 2: Propriedades físicas dos agregados (Anderton, 2000).....	10
Quadro 3: Granulometria dos agregados (Anderton, 2000)	10
Quadro 4: Proporções da mistura RMP (Anderton, 2000).....	11
Quadro 5: Granulometria dos agregados (Boundy, 1979).....	12
Quadro 6: Composição da calda (Boundy, 1979).....	12
Quadro 7: Composição da mistura betuminosa (Collop e Elliott, 1999)	14
Quadro 8: Valores especificados para a mistura betuminosa (Densit, 2000).....	14
Quadro 9: Granulometria do agregado (Collop e Elliott, 1997).....	14
Quadro 10: Granulometria do Densiphalt (Densit, 2000).....	15
Quadro 11: Resumo das resistências médias (Collop e Elliott, 1999).....	16
Quadro 12: Granulometria do agregado (Setyawan, 2003).....	16
Quadro 13: Efeito da temperatura e do tipo de calda no módulo de rigidez – 28 dias (Setyawan, 2003)	17
Quadro 14: Efeito do tipo de betume no módulo de rigidez (Setyawan, 2003)	17
Quadro 15: Efeito do tipo de betume no ISTM a diferentes temperaturas de ensaio (Setyawan, 2003)	18
Quadro 16: Granulometria do agregado (Oliveira, 2006)	19
Quadro 17: Características dos betumes (Oliveira, 2006).....	20
Quadro 18: Índice de vazios do esqueleto betuminoso poroso (Oliveira, 2006)	20
Quadro 19: Características da argamassa Densit (Oliveira, 2006)	21
Quadro 20: Módulo de rigidez do "Grouted Macadam" – Variação da temperatura (Oliveira, 2006)	21
Quadro 21: Módulo de rigidez do "Grouted Macadam" – Envelhecimento do betume (Oliveira, 2006)	22
Quadro 22: Granulometria das britas 3/6, 6/15 e 15/25.....	27
Quadro 23: Massa volúmica e absorção de água do agregado	28
Quadro 24: Dados técnicos do betume 50/70 (Lusasfal).....	28
Quadro 25: Formulação das misturas (% de agregados).....	29

Quadro 26: Granulometria das misturas	30
Quadro 27: Teor inicial de betume das misturas	31
Quadro 28: Porosidade em percentagem para os diferentes tipos de misturas e teores de betume	34
Quadro 29: Desgaste de ensaio Cantabro para a mistura M100 com diferentes teores de betume	36
Quadro 30: Módulo de rigidez das diferentes misturas através do ensaio de compressão diametral	37
Quadro 31: Baridade da mistura para diferentes teores de betume.....	39
Quadro 32: Dados do superplastificante Sika ViscoCrete 3000	40
Quadro 33: Resultados dos ensaios de fluidez com variação do teor de superplastificante	41
Quadro 34: Resistência à compressão da argamassa de cimento aos 28 dias	42
Quadro 35: Resistência à compressão da argamassa geopolimérica aos 14 dias	44
Quadro 36: Granulometria da mistura M100.....	46
Quadro 37: Módulo de rigidez aos 14 dias a uma temperatura de 20 °C.....	51
Quadro 38: Resistência à compressão aos 14 dias.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

RMP	–	<i>Resin Modified Pavement</i> (Pavimentos modificados com Resinas)
WES	–	<i>U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station</i> (Estação Experimental de Cursos de Água do Exército Americano)
OPC	–	Cimento Portland corrente
SF	–	Sílica de fumo
FA	–	Cinzas volantes
GM	–	<i>Grouted Macadam</i> (Mistura betuminosa impregnada com cimento)
NP	–	Norma Portuguesa
EN	–	<i>European Standard</i> (Norma Europeia)
EP	–	Estradas de Portugal
NLT	–	Normas del Laboratorio del Transporte
CIM	–	Argamassa de cimento
GEO	–	Argamassa de geopolímeros
CO ₂	–	Dióxido de carbono
LVDT	–	Linear Variable Displacement Transducer
pen	–	Penetração<

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 – Enquadramento	2
1.2 – Objectivos	3
1.3 – Conteúdo da dissertação e metodologia	4

1.1 – ENQUADRAMENTO

Este trabalho enquadra-se no estudo de pavimentos semi-flexíveis constituídos por misturas betuminosas impregnadas com cimentos (cimento Portland e outros).

Como se sabe, a escolha dos materiais para a pavimentação tem oscilado entre o asfalto, que representa os pavimentos flexíveis, e o betão hidráulico (à base de cimento Portland), que representa os pavimentos rígidos. Os pavimentos flexíveis são caracterizados pelo seu conforto na utilização e pela sua fácil manutenção. Por outro lado, os pavimentos rígidos têm uma resistência ao desgaste superior, sendo o conforto de utilização muito menor em termos comparativos e tendo como principal desvantagem a necessidade de existência de juntas de dilatação.

Existe porém uma outra alternativa que combina o melhor desses dois materiais, o pavimento semi-flexível. Este tipo de pavimento combina a flexibilidade e a ausência de juntas de dilatação do primeiro com a elevada capacidade de carga e de desgaste do segundo. A sua camada impermeável e a sua alta resistência ajudam na redução das tensões na camada de base subjacente. O pavimento semi-flexível é composto por uma mistura estrutural (estrutura ou “esqueleto”; *skeleton*, como se refere na bibliografia inglesa) de porosidade elevada, entre 25 a 35% de vazios, sendo depois preenchida por uma pasta de cimento muito fluida. Esta combinação de materiais torna o pavimento bastante resistente mecanicamente e com uma superfície resistente ao derramamento de materiais combustíveis, permitindo o seu uso em áreas industriais e aeroportos, associadas também a tráfego pesado e lento.

Note-se que os pavimentos semi-flexíveis diferenciam-se dos “tradicionais” pavimentos “semi-rígidos”, os quais são constituídos por uma camada de base rígida (de betão) sobre a qual são aplicadas camadas flexíveis (betuminosas). E, faz pois sentido utilizar a terminologia de “pavimentos semi-flexíveis”, uma vez que as “misturas betuminosas porosas impregnadas com cimento” são aplicadas sobre camadas betuminosas (porque a estrutura perde alguma flexibilidade). No entanto, este material também pode ser aplicado sobre bases rígidas e, nesse caso, poderá ficar a dúvida se em termos estruturais não se trata de um pavimento “rígido” ou “semi-rígido”, mas algo intermédio (o termo “semi-flexível” poderá não ser tão adequado neste caso uma vez que a estrutura do pavimento será mais rígida do que flexível).

Este tipo de pavimento é construído por duas fases. A primeira consiste na aplicação da mistura betuminosa porosa de acordo com a construção de pavimentos flexíveis. Em seguida, e normalmente no dia seguinte, é espalhada a argamassa sobre a superfície do pavimento, garantindo que atinge o fundo da camada e que preenche todos os vazios. A garantia de que o pavimento não entra em rotura prematura e cumpre a sua função depende da boa

conectividade entre vazios e de uma boa trabalhabilidade da argamassa, parâmetros que vão permitir que a argamassa flua de modo a preencher todos vazios.

Para o preenchimento da porosidade destas misturas porosas tem sido utilizada pasta de cimento Portland. No entanto, neste trabalho, propõe-se o uso de ligantes geopoliméricos.

Os geopolímeros são ligantes obtidos por activação alcalina que têm propriedades mecânicas e de durabilidade bastante boas, como a resistência aos ácidos, o comportamento a elevadas variações de temperatura e a resistência ao fogo. Os geopolímeros podem ser obtidos através da combinação de materiais alumino-silicatos finos com uma solução fortemente alcalina. No caso em estudo, produziram-se ligantes obtidos de lamas residuais das minas da Panasqueira. As minas da Panasqueira são consideradas um dos maiores depósitos de volframite do mundo e situam-se na localidade de Barroca Grande, a uma altitude de 687m. Esta mina actualmente produz um volume de agregados de 300.000 toneladas/ano e, durante a actividade extractiva, são geradas 30.000 toneladas/ano de lamas residuais, sem qualquer tipo de aproveitamento.

Tratando-se de um estudo inovador, sobre misturas betuminosas porosas impregnadas com geopolímeros, o trabalho em si é também um contributo para se conhecerem as propriedades dos pavimentos porosos semi-flexíveis, sendo ainda o primeiro trabalho experimental, deste tipo, realizado na Universidade da Beira Interior.

1.2 – OBJECTIVOS

O trabalho tem como objectivo geral o estudo laboratorial da composição e propriedades de misturas porosas impregnadas com geopolímeros para pavimentos semi-flexíveis. Neste âmbito, tem os objectivos específicos a seguir apresentados:

- Desenvolver um estado da arte (revisão bibliográfica) sobre as características, propriedades e aplicações dos pavimentos semi-flexíveis;
- Desenvolver um estudo laboratorial sobre misturas porosas impregnadas com cimento Portland e com geopolímeros.

No âmbito do estudo laboratorial serão desenvolvidos os seguintes aspectos:

- a) Metodologia de produção e caracterização da estrutura da mistura porosa;
- b) Estudo de composição e propriedades das pastas de cimento e geopolímero;
- c) Ensaio das propriedades mecânicas dos constituintes e da mistura impregnada.

1.3 – CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO E METODOLOGIA

No presente capítulo é apresentada uma introdução ao trabalho apresentado e os objectivos da pesquisa.

No 2º capítulo é feita em primeiro lugar uma revisão bibliográfica dos pavimentos semi-flexíveis, revelando-se a sua aplicação, constituição e propriedades, fazendo uma abordagem ao que já foi proposto por outros autores, e depois um estudo dos ligantes geopoliméricos.

No 3º capítulo apresenta-se o desenvolvimento experimental do trabalho onde se apresenta uma caracterização e propriedades dos materiais usados, da mistura betuminosa, das pastas e por fim da mistura betuminosa impregnada com os ligantes estudados.

Para finalizar, o 4º capítulo apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Pavimentos semi-flexíveis	6
2.1.1 – Introdução	6
2.1.2 – Aplicação.....	7
2.1.3 – Constituição	8
2.1.4 – Propriedades	9
2.1.5 – Características dos materiais.....	10
2.2 – Ligantes geopoliméricos	22

2.1 – PAVIMENTOS SEMI-FLEXÍVEIS

2.1.1 – INTRODUÇÃO

Um pavimento rodoviário pode ser definido como uma estrutura destinada a suportar a passagem dos veículos, assim como as condições climáticas a que está sujeito ao longo da sua vida. (Teresa Dias, 2006) Os pavimentos rodoviários são classificados pela natureza dos materiais que compõem as suas camadas superiores, dos quais resultam diferentes deformabilidades.

No Quadro 1 são apresentadas as vantagens e desvantagens mais relevantes dos diferentes tipos de pavimentos.

Quadro 1: Características dos vários tipos de pavimentos (adaptado de Setyawan, 2003)

Tipo de pavimento	Vantagens	Desvantagens
Flexível	Flexível, sem juntas, rápida entrada em funcionamento, boa qualidade de circulação	Suporta menos tensões e menor capacidade de carga, cor escura
Rígido	Suporta maiores tensões e maior capacidade de carga, cor clara	Entrada em funcionamento demorada, juntas, elevada espessura da camada, maiores custos
Semi-rígido	Elevada capacidade de carga, boa qualidade de circulação	Fendilhamento da base, reflexão de fendas, cor escura, susceptibilidade para rodeiras superficiais
Semi-flexível	Suporta maiores tensões, elevada durabilidade, sem juntas, rápida entrada em funcionamento	Duas fases de construção da camada

Em estradas ou zonas sujeitas a cargas pesadas e lentas, tais como aeroportos ou áreas industriais, é frequente recorrer-se à construção de um pavimento rígido pois quando possuem uma camada de desgaste flexível existe uma maior susceptibilidade para que desenvolvam deformações permanentes na sua estrutura.

Comparativamente com os pavimentos flexíveis, as principais desvantagens do uso de pavimentos rígidos estão associados ao tempo de construção e à necessidade de juntas de dilatação. Foi então concebido um novo tipo de pavimento, o semi-flexível, criando uma camada de desgaste resistente à rotina e sem a necessidade de juntas de dilatação. Este tipo

de pavimento combina as melhores qualidades dos pavimentos flexíveis e rígidos, nomeadamente a ausência de juntas, a elevada capacidade de carga e a vida útil.



Figura 1: Carote retirado de um pavimento semi-flexível (Densit, 2000)

Recuando até à década de 1950, na França, é possível encontrar o primeiro desenvolvimento deste tipo de pavimento, que foi usado como protecção da camada de desgaste contra o ataque de combustíveis e óleos usados. (van de Vem e Molenaar, 2004) Este processo ficou conhecido como *Salviacim* e foi desenvolvido pela construtora francesa *Jean Lefebvre Enterprises* como uma alternativa rentável para o cimento Portland (Anderton, 2000; Setyawan, 2003). O seu uso espalhou-se por vários países tais como: a Grã-Bretanha, a África do Sul, o Japão, a Austrália e a Arábia Saudita. (Ahlich e Anderton, 1991) Desde então produtos semelhantes têm sido utilizados com diferentes designações assim como: *Resin Modified Pavement (RMP)* nos Estados Unidos (Anderton, 2000); *Hardicrete Heavy Surfacing* (BBA, 1994), *Worthycim Heavy Duty Paving* (BBA, 1996), *Densiphalt* (Densit, 2000) e *Confalt* (Contec, 2005), na Europa; e *RP-Pavement* (Watababegumi, 2005), no Japão. Em todos os casos, regra geral, este tipo de pavimento é denominado por “*Macadame*” ou “*Grouted macadame*”.

2.1.2 – APLICAÇÃO

Tendo em conta as propriedades do pavimento semi-flexível, sobretudo a sua elevada capacidade de carga e resistência ao desgaste, a sua aplicação mais comum é zonas industriais, portos, aeroportos, estradas, áreas de estacionamento com tráfego pesado, hangares, e outras áreas sujeitas a cargas lentas e pesadas. (Zoorob e tal., 2002; Setyawan, 2003) Para exemplificar, entre 1988 e 2000, foram aplicados 165000m² deste material no Aeroporto de Copenhaga. (Mayer e Thau, 2001)

2.1.3 – CONSTITUIÇÃO

O pavimento semi-flexível, usado na camada superficial, é composto por uma mistura betuminosa aberta, normalmente apenas com agregados de uma dimensão e com uma percentagem de vazios entre os 25 e os 35%, e uma argamassa que é vertida e vai ocupar os espaços vazios no esqueleto (da estrutura).

No final obtém-se um pavimento que conjuga as melhores qualidades da mistura betuminosa e do betão, ou seja, a flexibilidade e a ausência de juntas da mistura betuminosa e a elevada capacidade de carga estática e resistência ao desgaste do betão. Esta camada é impermeável e protege as camadas subjacentes. A velocidade de construção e o período de tempo até a abertura ao tráfego é um grande avanço em relação ao pavimento rígido. (Setyawan, 2003)



Figura 2: Estrutura típica de uma camada de mistura porosa impregnada com cimento

Este tipo de camada de desgaste é normalmente construída com uma espessura entre os 30 e 60mm (Densit, 2000), embora existam registos de trabalhos com 80mm (van de Vem e Molenaar, 2004) e, segundo alguns fornecedores, é possível chegar a espessuras até 200mm (Contec, 2005).

A construção é feita por duas fases, para permitir que a mistura betuminosa arrefeça antes de aplicar a argamassa. A mistura betuminosa porosa é aplicada de modo convencional e é levemente compactada com um rolo de aço sem vibração, de modo a evitar a formação de fissuras. Assim que arrefece está pronta a receber a argamassa de alta fluidez (Zoorob et al., 2002). A argamassa é então espalhada sobre a superfície do pavimento garantindo que todos os vazios são completamente preenchidos. Depois do preenchimento dos vazios, a superfície pode ser tratada para lhe conferir certas propriedades, como aderência, durabilidade e aspecto.

2.1.4 – PROPRIEDADES

Foi efectuada uma revisão das principais propriedades do pavimento semi-flexível de acordo com os resultados disponibilizados pela literatura, nomeadamente a rigidez e a resistência à deformação permanente.

Em 1979, foi realizado na Universidade de Nottingham por Boundy (1979) um projecto de avaliação das propriedades mecânicas de um revestimento, patenteado com o nome *Hardicrete*. O projecto deste autor consistiu numa mistura porosa, normalmente de 40mm de espessura, que foi rebocada com uma argamassa de cimento ou resina de alta fluidez. Foram avaliadas a sua rigidez e resistência ao desgaste. Boundy sugeriu então que o coeficiente de Poisson deste material fosse 0,25 a 20°C. (Boundy, 1979)

Segundo Anderton (2000), outros estudos (Blight, 1984; TARMAC, 1986; Al-Qadi et al., 1993 e 1994) mostraram um bom desempenho por parte do pavimento *Salviacim* e *RMP* tendo as suas propriedades mecânicas atingido valores entre os normais para uma mistura betuminosa quente e para o cimento Portland. (Anderton, 2000)

O *RMP* tem geralmente 50mm de espessura e é aplicado sobre uma base de asfalto ou betão e a sua porosidade é de 30% (encaixando no intervalo entre 25 e 35%). Alrich e Anderton (1991) estudaram a sua deterioração, tendo como base de estudo uma secção experimental construída pela *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES)*, e concluíram que não existe deterioração significativa devido ao tráfico e que resistiu satisfatoriamente ao derramamento de combustível e óleo. (Alrich e Anderton, 1991)

Anderton (2000) fez também inspeções visuais a outros projectos experimentais construídos nos Estados Unidos, concluindo que as propriedades do material em relação á deformação permanente são boas, no entanto foram encontradas fendas nas camadas de betão subjacentes. A principal conclusão desse estudo foi a necessidade de incluir no estudo deste tipo de material as condições da camada de apoio e entender melhor o comportamento deste tipo de pavimento. (Anderton, 2000)

Na Dinamarca, no final dos anos 80, surgiu uma argamassa especial que trouxe grandes desenvolvimentos à estrutura dos pavimentos semi-flexíveis demonstrando um alto potencial para cargas pesadas e, especialmente, para cargas estáticas. Para otimizar esta nova solução foi necessário reajustar a mistura betuminosa de maneira a obter o maior índice de vazios e estudar um novo tipo de argamassa baseada na tecnologia micro-sílica que apresentasse propriedades superiores que lhe permitissem penetrar no esqueleto betuminoso. (Mayer e Thau, 2001)

Mais recentemente, em 2006, e tendo por base os autores acima descritos, Joel Oliveira desenvolveu um projecto para ajudar na compreensão dos pavimentos semi-flexíveis.

Tradicionalmente, os pavimentos semi-flexíveis têm sido usados como camada de desgaste, fazendo uso à sua elevada resistência à deformação e ao derramamento de combustível. Com os testes realizados concluiu-se que este tipo de pavimento tem potencial enquanto parte integrante da estrutura do pavimento. (Oliveira, 2006)

2.1.5 – CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Os agregados usados na mistura betuminosa devem ser partículas britadas, sólidas, resistentes, duráveis e calibradas de maneira a conferirem uma granulometria uniforme (Anderton, 1996). Em 2000, Anderton conduziu um estudo usando calcário britado para produzir amostras para caracterizar o mecanismo de dimensionamento do RMP. No Quadro 2 são apresentadas as propriedades físicas dos agregados usados. (Anderton, 2000)

Quadro 2: Propriedades físicas dos agregados (Anderton, 2000)

Métodos de ensaio	Designação ASTM	Especificações requeridas	Resultados dos ensaios
Desgaste de Los Angeles	C131	≤ 40%	23,2%
Dissolução em sulfato de sódio	C88	≤ 9%	2,7%
Lamelação e alongamento das partículas	D4791	≤ 8%	0%

Quadro 3: Granulometria dos agregados (Anderton, 2000)

Abertura do peneiro	Limites especificados	Mistura ótima
19,0 mm	100	100
12,5 mm	54 – 76	62,8
9,5 mm	38- 60	51,5
4,75 mm	10 – 26	17,6
2,36 mm	8 – 16	11,1
1,18 mm	–	7,3
600 μm	4 – 10	6,6
300 μm	–	2,4
150 μm	–	1,2
75 μm	1 - 3	1,1

A percentagem de vazios a atingir no estudo foi 30%, ficando no intervalo aceitável entre 25 a 35%. O betume usado deve ter uma penetração a 25°C entre 40 e 100; no caso mencionado foi usado um com valor de penetração de 89pen. O Quadro 3 apresenta a granulometria do agregado usado.

Anderton seguiu o guia de especificações do *Corps of Engineers* para o dimensionamento da calda, sendo no Quadro 4 apresentados os seus constituintes, com respectivas proporções e tolerâncias, tendo em conta os seguintes aspectos: o cimento de ser do tipo I; a areia de sílica deve ser limpa, resistente e durável, com uma granulometria entre os peneiros 1,18 mm e 75 μm ; a razão água/cimento deve ser de 0,65 a 0,75; o aditivo *Prosalvia-7* actua como superplastificante pela redução da viscosidade da calda. A viscosidade requerida é 7 a 10 segundos, para 1L de calda, medida pelo cone de Marsh, Figura 3.

Quadro 4: Proporções da mistura RMP (Anderton, 2000)

Material	Percentagem em peso	
	Especificação	Mistura usada
Cimento tipo I	34 – 40	36,6
Cinzas volantes	16 – 20	17,1
Areia de sílica	16 – 20	17,1
Água	22 – 26	25,7
Aditivo de resina	2,5 – 3,5	3,5

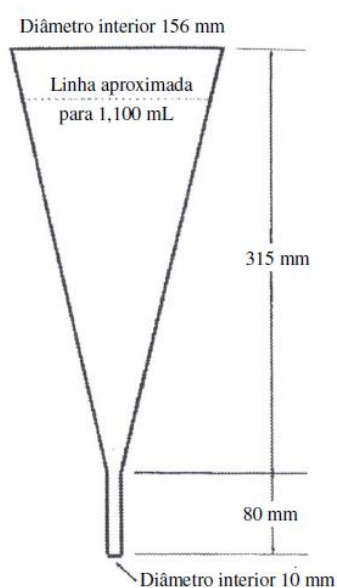


Figura 3: Cone de Marsh (Anderton, 2000)

Foram produzidos carotes cilíndricos e vigas para a determinação de propriedades como: tensão de rotura em tracção indirecta, em flexão e em compressão; módulo de deformabilidade (tracção indirecta); coeficiente de dilatação térmica; resistência ao gelo-degelo; e resistência à fadiga. Após a análise dos resultados obtidos, Anderton, conclui que a redução do módulo e o aumento do coeficiente de Poisson com o aumento da temperatura evidencia a natureza visco-elástica do RMP, permitindo assim a comparação directa da rigidez característica das misturas tradicionais.

Foram também produzidas vigas para caracterizar a resistência à fadiga do RMP. Foram submetidas repetidamente a ensaios de flexão em quatro pontos, realizado no modo de extensão controlada e a rotura à fadiga ocorreu quando a viga atingiu uma redução de 50% na rigidez durante o ensaio.

Anterior ao trabalho de Anderton, existe o estudo feito por Boundy, em 1979, para conhecer as propriedades mecânicas de uma camada patenteada com o nome de *Hardicrete*, que consiste numa camada de betuminoso aberto, usualmente com 40mm de espessura, que é preenchida por uma calda de cimento de elevada fluidez com aditivo. Foi escolhido um betume 60/70pen e no Quadro 5 é apresentada a granulometria usada. O Quadro 6 diz respeito aos constituintes da calda de cimento.

Quadro 5: Granulometria dos agregados (Boundy, 1979)

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de agregados passados
20	100
12,5	95
9,5	35
6,2	10
2,5	6
1,2	0

Quadro 6: Composição da calda (Boundy, 1979)

Material	Percentagem em massa
Cimento	44,3
Areia	14,8
Pó de sílica	14,8
Aditivo de resina	6,3
Água	19,8

Boundy produziu em laboratório amostras cilíndricas para realizar ensaios de rigidez e fadiga utilizando o modo cilíndrico de tração e compressão. A Figura 4 representa o resumo dos resultados obtidos a diferentes temperaturas e diferentes níveis de tensão, para amostras com 30 dias. Observou-se através de ensaios para analisar o efeito da passagem de tráfego logo após a realização da camada que a redução de rigidez era notória. O fenômeno das deformações permanentes também foi alvo de estudo e foi considerado desprezável devido à sua pequena magnitude. O valor para coeficiente de Poisson sugerido por Boundy foi de 0,25, a 20°C. (Boundy, 1979)

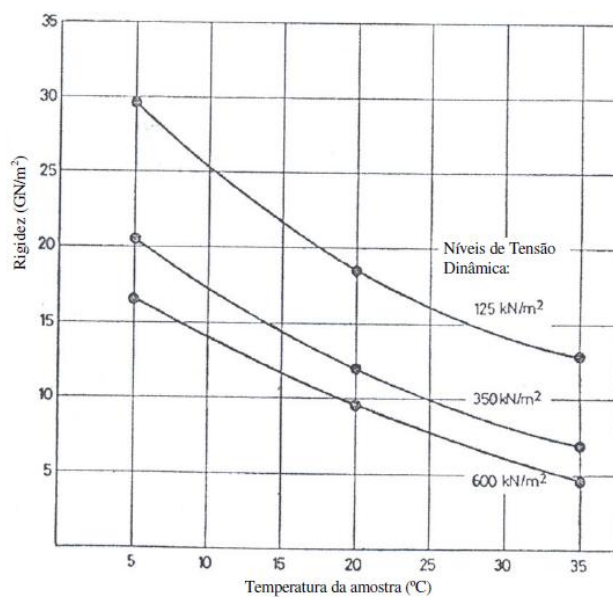


Figura 4: Módulo de rigidez do Hardicrete em função da temperatura (Boundy, 1979)

O *Densiphalt* é constituído por uma camada betuminosa aberta, de elevada porosidade, e uma espessa cobertura de betume envolvendo os agregados. Uma calda fluida, sendo o pó feito pela Densit (Dinamarca), vai preencher os vazios existentes. Segundo Collop e Elliott (1999), a argamassa contém um ligante hidráulico melhorado com micro-sílica, que permite uma melhor penetração da estrutura de vazios no esqueleto betuminoso, assim, obtendo-se assim uma melhor densidade teórica do enchimento, comparativamente com as caldas tradicionais. (Collop e Elliott, 1999)

No Quadro 7 apresenta-se a composição da mistura betuminosa e no Quadro 8 apresentam-se os valores de referência especificados pela Densit (2000).

Quadro 7: Composição da mistura betuminosa (Collop e Elliott, 1999)

Material	Percentagem em massa
Agregado britado tamanho nominal 10 mm	91,75
Betume – 200pen	4,1
Filler calcário	4,0
Fibras	0,15

Quadro 8: Valores especificados para a mistura betuminosa (Densit, 2000)

Material	Percentagem em massa
Agregado britado vulgar	91,2 – 92,2
Betume	3,6 – 4,6
Filler calcário	4,0
Fibras	0,2

O Quadro 9 diz respeito à granulometria do agregado usado por Collop e Elliott e no Quadro 10 são apresentadas as granulometrias especificadas por Densit. A granulometria tipo 8 é específica para espessuras de 30 a 50 mm e a tipo 12 é para espessuras de 40 a 60 mm.

Quadro 9: Granulometria do agregado (Collop e Elliott, 1997)

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de agregados passados
14	100
10	85 – 100
6,3	0 – 35
5,0	0 – 10
2,36	0 – 2

Quadro 10: Granulometria do Densiphalt (Densit, 2000)

Abertura do peneiro (mm)	Tipo 8	Tipo 12
19	–	100
12,5	100	95 – 100
8	95 – 100	< 20
4,75	< 30	< 12
2	< 10	< 10
0,075	4 – 5	4 – 5

As especificações do Densit revelam que o agregado deve ser limpo, sólido, durável e constituído por partículas angulares produzidas por britagem de rocha ou cascalho. A matéria orgânica, argila ou outro material deteriorável, não devem exceder a percentagem de 0,5%. O tipo de betume deve ser escolhido de acordo com a localização da aplicação e as condições atmosféricas, sendo o valor de penetração entre 85-100pen e 120-150pen.

A calda do Densiphalt é produzida acrescentado água ao pó da Densit, de modo a conferir a fluidez necessária para preencher os vazios, sendo sugerido o valor de 16,2% de água por massa de pó. A fluidez deve ser controlada usando o funil Densiphalt normalizado, sendo o tempo necessário para escorrer um litro de calda entre 10 a 18 segundos.

No seu estudo, Collop e Elliott, usaram 17,5% de água por massa de pó e realizaram amostras para ensaios de determinação da resistência à compressão e à flexão, do módulo de rigidez, da resistência à fadiga e á deformação permanente. A realização dos ensaios foi realizada aos 1, 7 e 28 dias, tendo sido usados cubos para a determinação da resistência à compressão e vigas para a resistência à flexão. Os resultados apresentam-se no Quadro 11 e mostraram que 79% e 87% da resistência aos 28 dias, respectivamente para resistência à compressão e à flexão, foram obtidas 24 horas após a calda ter sido vertida, o que indica que o efeito da passagem do tráfego pouco tempo após a sua execução não deve reduzir a resistência final. (Collop e Elliott, 1999)

Quadro 11: Resumo das resistências médias (Collop e Elliott, 1999)

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)
1	34 – 40	36,6
7	16 – 20	17,1
28	16 – 20	17,1

Setyawan (2003) realizou estudos de vários tipos de misturas betuminosas preenchidas com calda, tendo como variações os tipos de ligantes utilizados quer na calda quer na produção da mistura betuminosa. A fim de investigar o tipo de calda a diferentes temperaturas de ensaio, realizou ensaios de determinação do módulo de rigidez em tracção indirecta, utilizando uma mistura betuminosa produzida com agregado calcário (HL), cuja granulometria se encontra no Quadro 12. (Setyawan, 2003)

Quadro 12: Granulometria do agregado (Setyawan, 2003)

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de agregados passados
14	100
10	90
6,3	38
4,75	8
2,36	5
0,075	3

Em relação à calda utilizada, neste estudo foram usadas três combinações de ligantes: o cimento Portland corrente (OPC), sílica de fumo (SF) e cinzas volantes (FA). O primeiro tipo de calda (OPC) era composto apenas por cimento Portland; o segundo (SF) tinha na sua composição 95% de cimento Portland e 5% de sílica de fumo; por fim o terceiro (FA&SF) compreendia 65% de cimento Portland, 30% de cinzas volantes e 5% de sílica de fumo. Os ensaios foram realizados após 28 dias de cura e os resultados são apresentados no Quadro 13 e ilustrados na Figura 5, observando-se que os diferentes tipos de calda têm um efeito muito reduzido no módulo de rigidez.

Quadro 13: Efeito da temperatura e do tipo de calda no módulo de rigidez – 28 dias (Setyawan, 2003)

Tipo de misturas betuminosas preenchidas com calda	Módulo de rigidez em tracção indirecta – 28 dias (MPa)		
	5°C	20°C	60°C
HL/OPC-GM	24330	15530	1880
HL/SF-GM	25920	16580	1930
HL/FA%SF-GM	25370	16180	1770

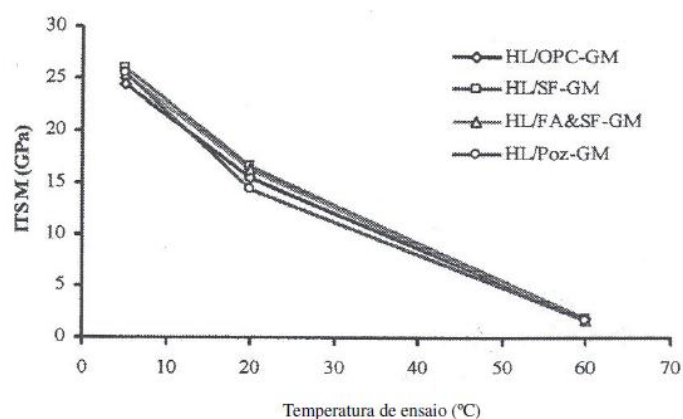


Figura 5: Efeito da calda no módulo de rigidez em tracção indirecta (ISTM), aos 28 dias, a diferentes temperaturas (Setyawan, 2003)

Durante o estudo, Setyawan, investigou o efeito do tipo de betume no módulo de rigidez em tracção indirecta utilizando um betume 50pen (HL) e uma emulsão catiónica a 62% (CL). Ambas as misturas foram preenchidas com uma calda idêntica de sílica de fumo (SF). Os resultados apresentam-se no Quadro 14 e na Figura 6.

Quadro 14: Efeito do tipo de betume no módulo de rigidez (Setyawan, 2003)

Material	Módulo de rigidez em tracção indirecta a 20°C (MPa)		
	1 dia	7 dias	28 dias
HL/SF-GM	12120	13390	16180
CL/SF-GM	4350	8440	10320

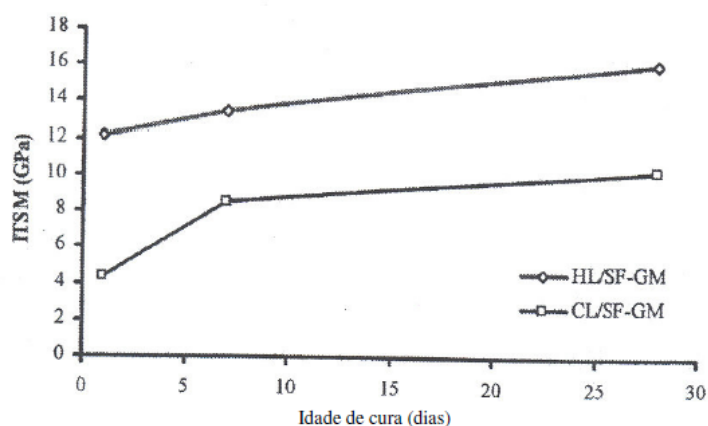


Figura 6: Efeito do tipo de betume no módulo de rigidez em tracção indirecta, a diferentes idades de cura (Setyawan, 2003)

Foram também avaliados os dois tipos de betume utilizados aos 28 dias, a diferentes temperaturas, cujos resultados são apresentados no Quadro 15 e na Figura 7, tendo-se verificado que as misturas produzidas com emulsão betuminosa são menos rígidas que aquelas em que foi utilizado o betume, principalmente para um tempo de cura reduzido (7dias). Tal deve-se ao facto de o esqueleto da mistura a frio ainda não ter desenvolvido resistência suficiente (Setyawan, 2003).

Quadro 15: Efeito do tipo de betume no ISTM a diferentes temperaturas de ensaio (Setyawan, 2003)

Material	Módulo de rigidez em tracção indirecta aos 28 dias de cura (MPa)		
	5 °C	20 °C	60 °C
HL/SF-GM	25920	16580	1930
CL/SF-GM	17350	10320	3910

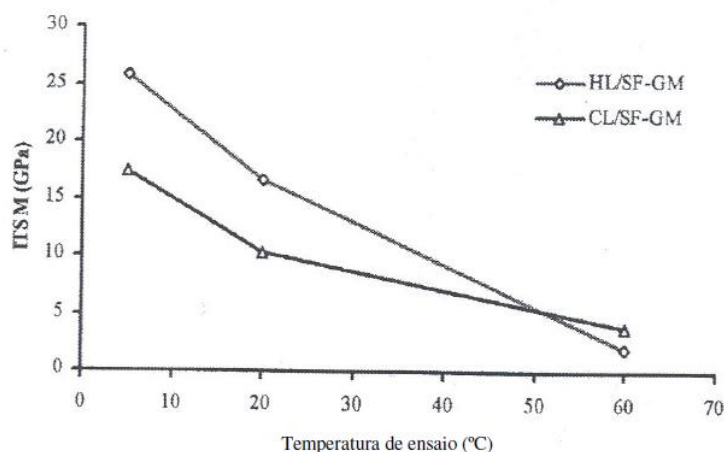


Figura 7: Efeito do tipo de betume no módulo de rigidez em tracção indirecta a diferentes temperaturas de ensaio (Setyawan, 2003)

Em 2006, Oliveira conduziu um projecto de pesquisa no qual usou uma argamassa comercial conhecida por Densiphalt. O projecto é composto por um esqueleto betuminoso poroso, com 25 a 30% de vazios, no qual a argamassa é despejada. A produção desta argamassa realiza-se através da adição de água a um pó de cimento pré-doseado. (Oliveira, 2006)

Neste estudo foi utilizado agregado obtido a partir de pedra britada, maioritariamente granito, e com um tamanho nominal de 10 mm, cuja granulometria se apresenta no Quadro 16. A granulometria utilizada foi semelhante à adoptada por Setyawan, em 2003.

Quadro 16: Granulometria do agregado (Oliveira, 2006)

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de agregados passados
14	100
10	89,5
6,3	1,9
5	0,8
2,36	0,2

Foram utilizados três tipos de betume para a concretização deste estudo a fim de avaliar a sua influência nas propriedades deste tipo de pavimento. Os betumes e respectivas características apresentam-se no Quadro 17.

Quadro 17: Características dos betumes (Oliveira, 2006)

Betume	Penetração (mm)	Temperatura de amolecimento (°C)
160/220	19,2	36,5
40/60	52	51,2
Polymer Modified Bitumen (PMB)	11/15	≥70

Para a produção da mistura foi decidido o uso de fibras com o objectivo de aumentar a espessura do betume, o revestimento dos agregados e a estabilidade do esqueleto poroso. O esqueleto foi produzido em laboratório colocando os agregados e o betume na estufa a 140 °C. Os agregados quentes foram misturados com as fibras, para haver uma boa distribuição das fibras, e foi depois adicionado o betume. A mistura foi feita mecânica e manualmente a fim de evitar a segregação do material. Dependendo do tipo de provete produzido, foram usados dois processos de compactação: o rolo compactador e o martelo vibratório. Após a compactação houve uma espera de 24h até ao enchimento com a argamassa. Para determinar a porosidade da mistura betuminosa foram usados dois métodos: o primeiro consistia em, mantendo o provete no molde, preencher os vazios com água e medir o volume necessário para encher até à superfície, correspondendo esse volume ao índice de vazios; o segundo consistia em calcular o índice de vazios de 4 provetes cilíndricos de acordo com a norma EN 12697-6 (2003). Os resultados da porosidade apresentam-se no Quadro 18.

Quadro 18: Índice de vazios do esqueleto betuminoso poroso (Oliveira, 2006)

Espessura do provete	Porosidade (%)	
	Método 1	Método 2
80 mm	28,5	28,28 (valor médio)
40 mm	29,8	28,48 (valor médio)

Foram realizados ensaios mecânicos às argamassas utilizadas no projecto, para que fossem melhor caracterizadas, que consistiram em determinar a resistência à compressão, através de cubos com 50mm de lado, e a resistência à flexão, usando vigas de 350mm com secção transversal quadrada com 50mm de lado. Foi usada uma taxa de acréscimo de carga de 2,4 kN/s para o ensaio de compressão e uma taxa de 50 N/s para o ensaio de flexão. Os resultados apresentam-se no Quadro 19.

Quadro 19: Características da argamassa Densit (Oliveira, 2006)

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
1	43,8	–
4	67,7	–
7	74,4	–
28	110,0	12,0

Foram realizados ensaios de tracção indirecta para dois tipos de situações: a variação de temperatura (Quadro 20) e o envelhecimento do betume (Quadro 21). Na primeira situação foram realizados ensaios a três temperaturas diferentes, 10, 20 e 40°C. Na segunda foi efectuado o ensaio dos provetes a 20°C e foram depois colocados numa estufa a 85°C durante 120 horas, sendo depois novamente ensaiados.

Quadro 20: Módulo de rigidez do "Grouted Macadam" – Variação da temperatura (Oliveira, 2006)

Temperatura (°C)	Módulo de rigidez aos 28 dias (MPa)
10	8506
20	6699
40	2288

Quadro 21: Módulo de rigidez do "Grouted Macadam" – Envelhecimento do betume (Oliveira, 2006)

Provete	Módulo de rigidez a 20 °C (MPa)	
	Antes do envelhecimento	Depois do envelhecimento
1	8576	12466
2	7829	11882
3	9677	14366
4	10069	14343
Média	9038	13264

2.2 – LIGANTES GEOPOLIMÉRICOS

A forma mais eficiente de tornar a indústria da construção uma actividade sustentável passa pela incorporação de resíduos de outras indústrias em materiais de construção. Uma vez que o betão é o material mais utilizado na construção a nível mundial (2000Mt/ano), existe já um extenso estudo na investigação da utilização de resíduos em betões. (Fernando Torgal e Said Jalali, 2007)

Neste contexto, existe um empenho por parte da comunidade científica em procurar novos processos, tecnologias e materiais ambientalmente sustentáveis que possam ser tidos como alternativos, como é o caso dos ligantes obtidos por activação alcalina.

Os ligantes obtidos por activação alcalina, vulgarmente conhecidos por ligantes geopoliméricos, são utilizados pelo Homem há mais tempo do que se pensa, tendo o seu uso sido demonstrado em obras da antiguidade, como as pirâmides egípcias. Foi em 1979 que Joseph Davidovits introduziu o termo "geopolimero" Foi também ele que patenteou os ligantes por activação alcalina de caulino e metacaulino (Davidovits, 1979). Estes ligantes são objecto de estudo há já algum tempo, mas continua a haver a necessidade de aprofundar os conhecimentos nesta área.

Os geopolímeros são produzidos por processos de polimerização que envolvem reacções químicas sob condições alcalinas em que os minerais Al-Si reagem entre si criando polímeros com ligações do tipo Si-O-Al-O, com a seguinte fórmula empírica $Mn [-(Si-O)_z - Al - O]n$ w H_2O , onde n é o grau de polimerização, z o número de ordem (1, 2 ou 3) e M é um catião alcalino, como o potássio ou o sódio. (Davidovits, 1999)

A produção de geopolímeros consiste em misturar alumino-silicatos finos com uma solução alcalina, obtendo-se um gel vítreo de presa rápida, que num curto espaço de tempo adquire uma resistência à compressão significativa. O material utilizado como precursor e activador alcalino vai influenciar o comportamento dos geopolímeros. Assim, para cada tipo de alumino-silicato existem condições de reactividade específicas e concentrações e dosagens dos activadores dependentes das características do precursor. (Fernando Torgal, 2006) Os ligantes geopoliméricos podem ser obtidos de diferentes materiais alumino-silicatados como: o metacaulino, as cinzas volantes, a escória de alto-forno e as lamas residuais.

Estudos recentes demonstraram que o alumino-silicato de lamas residuais de uma exploração mineira de tungsténio local, minas da Panasqueira, tem uma boa reactividade com activadores alcalinos, após um processo de calcinação térmica e sob certas condições de mistura. Os resultados mostraram que apresentam maior resistência quando combinadas com hidróxido de sódio (na concentração de 10M) e silicato de sódio. (Fernando Torgal et. al., 2008).

Neste projecto de investigação pretendeu-se comparar, no âmbito do desenvolvimento de um pavimento semi-fléxivel, uma argamassa convencional de cimento com uma argamassa geopolimérica. Para isso, foi usado como precursor as lamas residuais das minas da Panasqueira e tidos por base estudos anteriores que analisaram as concentrações e razões de activadores alcalinos.

Embora os materiais geopoliméricos se apresentem como material alternativo ao cimento Portland, existe uma grande diferença entre ligantes obtidos por activação alcalina e o cimento Portland, que vão desde os mecanismos de formação até à natureza da reacção dos produtos obtidos. São as limitações do cimento Portland, como a elevada produção de CO₂ na sua produção, o fraco desempenho mecânico e físico às agressões do meio, que trazem o entusiasmo ao estudo de uma argamassa inovadora.

Entre as propriedades de durabilidade dos geopolímeros destacam-se a resistência ao desgaste ácido, o comportamento a variações de temperatura elevadas e a resistência ao fogo. (Rangan, 2009)

CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 – Introdução	26
3.2 – Características dos materiais	26
3.3 – Caracterização da mistura betuminosa porosa	29
3.3.1 – Granulometria	29
3.3.2 – Determinação da percentagem de betume	30
3.3.3 – Fabricação e compactação dos corpos de prova	31
3.3.4 – Porosidade	34
3.3.5 – Ensaio Cantabro	35
3.3.6 – Compressão diametral	37
3.3.7 – Baridade	38
3.4 – Caracterização das argamassas	39
3.4.1 – Argamassa de cimento	40
3.4.1 – Argamassa geopolimérica	43
3.6 – Características das misturas betuminosas impregnadas	45
3.6.1 – Produção de misturas impregnadas	45
3.6.2 – Ensaio de tracção indirecta	49
3.6.3 – Ensaio de compressão	52

3.1 – INTRODUÇÃO

O material estudado neste projecto é geralmente classificado de “Macadame”. A mistura betuminosa adoptada tinha entre 25 a 30% de vazios. Foram estudados várias composições de misturas até encontrar a mistura que mais se aproximava do pretendido para o projecto. Para proceder ao seu estudo foram abordados dois tipos diferentes de ligantes a impregnar no esqueleto poroso: uma argamassa de cimento e uma argamassa geopolimérica.

Neste capítulo apresenta-se a caracterização de cada componente utilizado na produção do pavimento semi-flexível, assim como uma caracterização básica da mistura padrão. São reveladas as propriedades físicas dos agregados e betume utilizados e a caracterização das argamassas, incluindo o seu procedimento de mistura e aplicação.

3.2 – CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Actualmente o pavimento semi-flexível é usado para camadas de desgaste de pavimentos sujeitos a grandes cargas e desgaste, devido às suas boas características à rotação, à resistência e ao derramamento de óleos e combustíveis. Os agregados utilizados neste tipo de camada devem ser sólidos, duráveis e com alta resistência à abrasão. Idealmente devem ser obtidos a partir de pedra britada e de uma só dimensão, com a finalidade de obter o maior índice de vazios possível.

Neste estudo foi utilizado agregado granítico proveniente de uma pedreira da região, situada na margem esquerda da Ribeira da Meimoa (concelho de Fundão), cuja exploração está a cargo da empresa J. Bartolomeu. Os agregados de origem granítica são os mais utilizados para a construção de estradas em Portugal, principalmente na Beira Interior. Para a realização deste projecto foram utilizadas três tipos de britas, a que a central de britagem atribuiu a seguinte classificação: Brita 3/6, Brita 6/15 e Brita 15/25.

Para efectuar a separação das fracções granulométricas, de acordo com a norma NP EN 933-1 (2000), os três tipos de brita foram submetidos a peneiração, recorrendo ao uso da série de peneiros de malha quadrada. Os agregados foram secos em estufa a 110°C, até atingir massa constante. Os peneiros normalizados, após pesagem em balança electrónica, foram dispostos por ordem decrescente no agitador mecânico. O material foi de seguida submetido a uma vibração durante 5 minutos. Os resultados das três granulometrias encontram-se representados no Quadro 22 e na Figura 8.

Quadro 22: Granulometria das britas 3/6, 6/15 e 15/25

Abertura do peneiro (mm)	Porcentagem de Material Passado (%)		
	Brita 3_6	Brita 6_15	Brita 15_25
40,000	100,00	100,00	100,00
25,000	100,00	100,00	84,54
19,000	100,00	99,37	61,53
12,500	100,00	55,19	3,44
8,000	100,00	15,57	0,06
4,000	50,14	0,60	0,03
2,000	7,71	0,17	0,02
1,000	2,68	0,13	0,02
0,500	2,68	0,13	0,02
0,250	2,68	0,13	0,02
0,125	2,68	0,13	0,02
0,063	2,68	0,13	0,02
Material restante no fundo	0,00	0,00	0,00

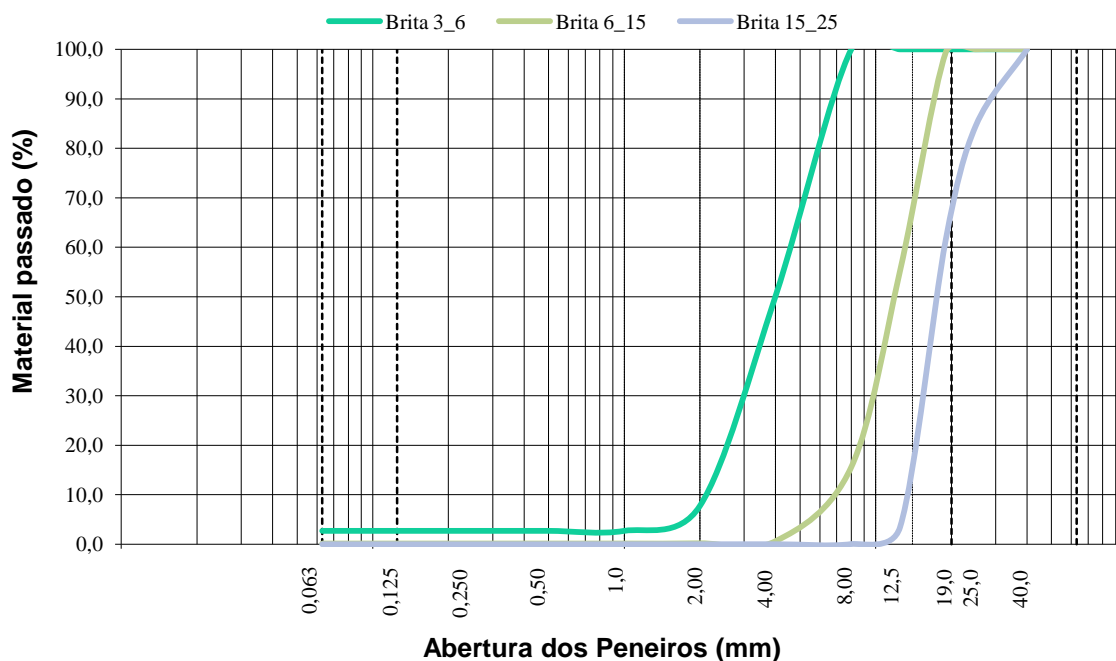


Figura 8: Curvas granulométricas das britas 3/6, 6/15 e 15/25

A massa volúmica e a absorção de água foram determinadas de acordo com a norma NP EN 1097-6 (2003) e obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 23.

Quadro 23: Massa volúmica e absorção de água do agregado

Massa volúmica do material impermeável das partículas [g/cm ³]	Massa volúmica das partículas secas em estufa [g/cm ³]	Massa volúmica das partículas saturada com superfície secas [g/cm ³]	Absorção de água (% de massa seca)
2,71	2,66	2,70	0,6

O betume utilizado na realização deste estudo foi um betume 50/70, cedido pela Lusasfal, cujas características técnicas se encontram no Quadro 24. Durante o projecto foram usados diferentes teores de betume até encontrar a percentagem que se adequava.

Quadro 24: Dados técnicos do betume 50/70 (Lusasfal)

Características	Norma	Mínimo	Máximo
Penetração (25°C)	EN 1426	5 mm	7 mm
Índice de penetração	EN 12591	-1,5	+0,7
Temperatura de amolecimento	EN 1427	46	54
Ponto de fragilidade Fraass	EN 12593	–	-8
Solubilidade	EN 12592	99,0	–
Ponto de inflamação	EN ISO 2592	230	–
Resistência ao endurecimento a 163 °C (EN 12607-1)			
Varição de massa (valor absoluto)	EN 12607-1	–	0,5
Penetração retida	EN 1426	50	–
Varição de temperatura de amolecimento	EN 1427		11

3.3 – CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA BETUMINOSA POROSA

3.3.1 – GRANULOMETRIA

Um dos parâmetros mais importantes para a construção de um pavimento semi-flêxível é o índice de vazios do seu esqueleto (estrutura) betuminoso. Para chegar ao teor pretendido realizaram-se várias misturas betuminosas usando como variações a mistura de agregados e o teor de betume. Para a obtenção de diferentes granulometrias, e consequentemente porosidades distintas, adoptaram-se as percentagens de agregados referidas no Quadro 25.

Quadro 25: Formulação das misturas (% de agregados)

Mistura	Brita 3/6	Brita 6/15	Brita 15/25
M10_90	10	90	0
M100	0	100	0
M80_20	0	80	20
M70_30	0	70	30
M30_25_45	30	25	45

No Quadro 26 e Figura 9 apresentam-se, respectivamente, as granulometrias e as curvas granulométricas das misturas dos estudos preliminares.

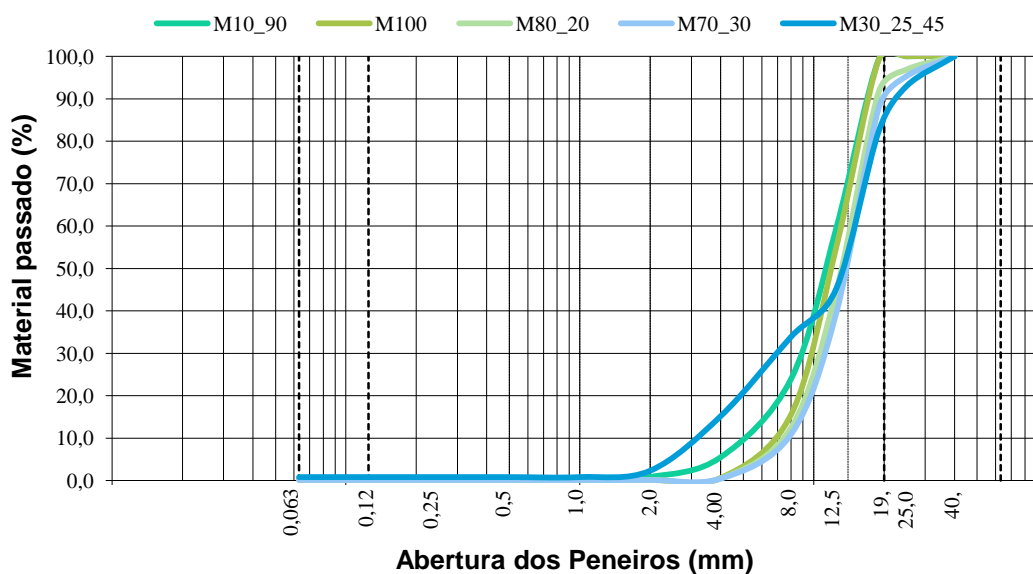


Figura 9: Curvas granulométricas das misturas

Quadro 26: Granulometria das misturas

Abertura do peneiro (mm)	Porcentagem de Material Passado (%)				
	M10_90	M100	M80_20	M70_30	M30_25_45
40,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,000	100,00	100,00	96,91	95,36	93,04
19,000	99,43	99,37	91,80	88,02	82,53
12,500	59,66	55,18	44,83	39,66	45,34
8,000	23,99	15,54	12,44	10,90	33,91
4,000	5,53	0,57	0,46	0,41	15,20
2,000	0,90	0,14	0,12	0,10	2,35
1,000	0,39	0,13	0,10	0,09	0,84
0,500	0,39	0,13	0,10	0,09	0,84
0,250	0,39	0,13	0,10	0,09	0,84
0,125	0,39	0,13	0,10	0,09	0,84
0,063	0,39	0,13	0,10	0,09	0,84
Material restante no fundo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

3.3.2 – DETERMINAÇÃO DA PERCENTAGEM DE BETUME

Para o cálculo do teor inicial de betume foi tido em conta o caderno de encargos da EP. A percentagem de betume residual é obtida a partir da superfície específica dos agregados (S_e), do módulo de riqueza do betume (k) e de um coeficiente (α) corrector da massa volúmica da mistura de agregados (ρ_a), de acordo com a seguinte equação:

$$P_b = k \cdot \alpha \cdot \Sigma^{1/5}$$

Sendo:

P_b – Percentagem de betume residual;

k – Módulo de riqueza do betume;

$$\alpha = \frac{2,65}{\rho_a}$$

$$\Sigma = \frac{1}{100} (0,25G + 2,3S + 12s + 135f)$$

onde:

Σ – Superfície específica

G – Proporção ponderal de elementos superiores a 6,3 mm

S – Proporção ponderal de elementos compreendidos entre 6,3 mm e 0,315 mm

s – Proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,315 mm e 0,063 mm

f – Proporção ponderal de elementos inferiores a 0,063 mm

No Quadro 27 são apresentadas as percentagens de betume para cada uma das misturas utilizadas nos estudos preliminares.

Quadro 27: Teor inicial de betume das misturas

Mistura	K	α	Σ	Pb (%)
M10_90	3,5	0,98	0,754	3,2
M100	3,5	0,98	0,576	3,1
M80_20	3,5	0,98	0,511	3,0
M70_30	3,5	0,98	0,479	3,0
M30_25_45	3,5	0,98	0,962	3,4

3.3.3 – FABRICAÇÃO E COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Preliminarmente foram realizadas amostras onde se procedeu a adição de filler na mistura, tais como, carbonato de cálcio, pó de pedra, cimento e pó de vidro. Tendo-se chegado á conclusão que o cimento era aquele que permitia uma melhor trabalhabilidade e adesão do betume ao agregado.

Os corpos de prova foram preparados e moldados pelo método de Marshall, corrente em Portugal. Foram moldados 3 corpos de prova para cada tipo de mistura e para cada teor de betume. Cada corpo de prova foi fabricado individualmente, aquecendo todo o material a 160°C durante 2 horas.



Figura 10: Moldes utilizados para a preparação dos corpos de prova Marshall



Figura 11: Mistura manual do corpo de prova

A compactação dos provetes foi feita tendo por base a metodologia de Marshall, de acordo com a norma EN 12679-30 (2004), usando a máquina representada na Figura 12. Foi colocado o conjunto na base do compactador, segurando-se com o suporte de fixação, e colocado um filtro no fundo. Verteu-se a totalidade da mistura no molde e distribuiu-se a mistura através de 15 golpes na periferia e 10 no interior. Alisou-se a superfície, aplicou-se outro filtro e foram aplicadas 50 pancadas sobre cada face do corpo de prova. Os provetes foram desmoldados 24 horas após o fabrico.



Figura 12: Compactador Marshall



Figura 13: Corpos de prova no molde após compactação

3.3.4– POROSIDADE

A porosidade de uma mistura betuminosa representa a diferença entre o volume aparente da mistura e o volume ocupado pelos agregados e betume, e é calculada através da norma NLT-168/90. Os resultados para as diferentes misturas estão apresentados no Quadro 28.

Quadro 28: Porosidade em percentagem para os diferentes tipos de misturas e teores de betume

Mistura	Teor de betume (%)	Porosidade(%)
M10_90	4,0	24
	3,5	24
M100	4,0	25
	3,5	24
	3,0	25
	2,5	25
	2,0	26
M80_20	4,0	25
M70_30	3,5	25
M30_25_45	5,0	17
	4,5	19
	4,0	18
	3,5	20
	3,0	21
	2,5	22
	2,0	22

A porosidade é foi calculada com base na seguinte equação:

$$P(\%) = \frac{D_{m\acute{a}x} - D_{ap}}{D_{m\acute{a}x}}$$

onde:

$$D_{ap} = \frac{A}{V} - \text{Densidade relativa aparente}$$

A – Massa do provete

$$V - \text{Volume geométrico} = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * h$$

$$D_{máx} = \frac{100}{\frac{T_1}{d_1} + \frac{T_2}{d_2} + \dots + \frac{T_b}{d_b}} - \text{Densidade máxima teórica}$$

T_n – Percentagem de cada componente da mistura

d_n – Densidade relativa de cada componente da mistura

Comparando os resultados da porosidade com a curva granulométrica das misturas foi possível constatar que a mistura, em termos granulométricos, que melhor se adequava ao projecto que era pretendido era a M100.

3.3.5– ENSAIO CANTABRO

O ensaio Cantabro permite avaliar indirectamente a resistência à desagregação da mistura betuminosa face a efeitos abrasivos causados pelo tráfego, dando indicação da coesão dos vários tipos de misturas ensaiadas. Este ensaio foi o adoptado por ser o mais válido para misturas abertas.



Figura 14: Máquina de desgaste de Los Angeles

O seu procedimento consiste em pesar o corpo de prova antes do ensaio, introduzi-lo no tambor da máquina de Los Angeles, (Figura 14), sem a carga abrasiva das bolas, e fazendo-o girar durante 300 voltas. No final retira-se o corpo de prova e é novamente pesado. A perda de massa traduz o desgaste do corpo de prova e calcula-se pela expressão:

$$d = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100$$

onde:

d – Valor da perda por desgaste do corpo de prova (%)

M₁ – Massa inicial do corpo de prova (g)

M₂ – Massa final do corpo de prova (g)

Os resultados do ensaio Cantabro para a mistura estão expostos na Figura 15 e no Quadro 29.

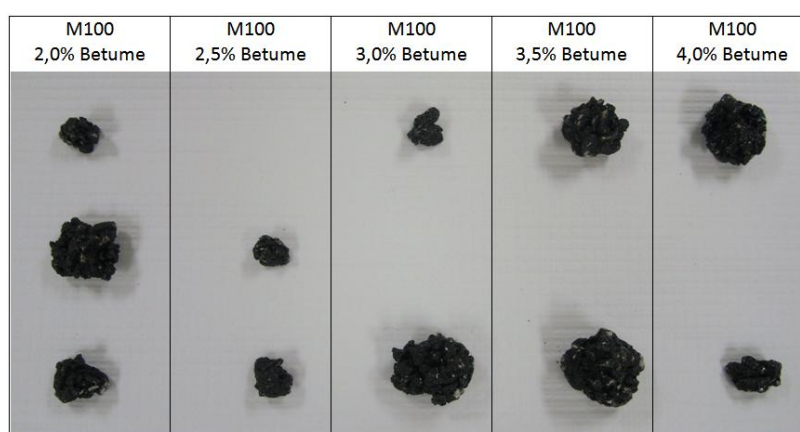


Figura 15: Corpos de prova após ensaio Cantabro

Quadro 29: Desgaste de ensaio Cantabro para a mistura M100 com diferentes teores de betume

Mistura	Teor de betume	Desgaste (%)
M100	4,0%	96
	3,5%	94
	3,0%	97
	2,5%	99
	2,0%	97

3.3.6– COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para melhor avaliar o comportamento das misturas foi efectuada uma análise do seu comportamento à tracção indirecta, pela EN 12697-26 (2004). Este valor de resistência obtém-se através da aplicação de uma carga compressiva no provete cilíndrico em dois pontos diametralmente opostos. Os resultados são apresentados no Quadro 30.

Para a realização deste ensaio foi considerado um coeficiente de Poisson de 0,35, a 20°C. (Oliveira, 2006).

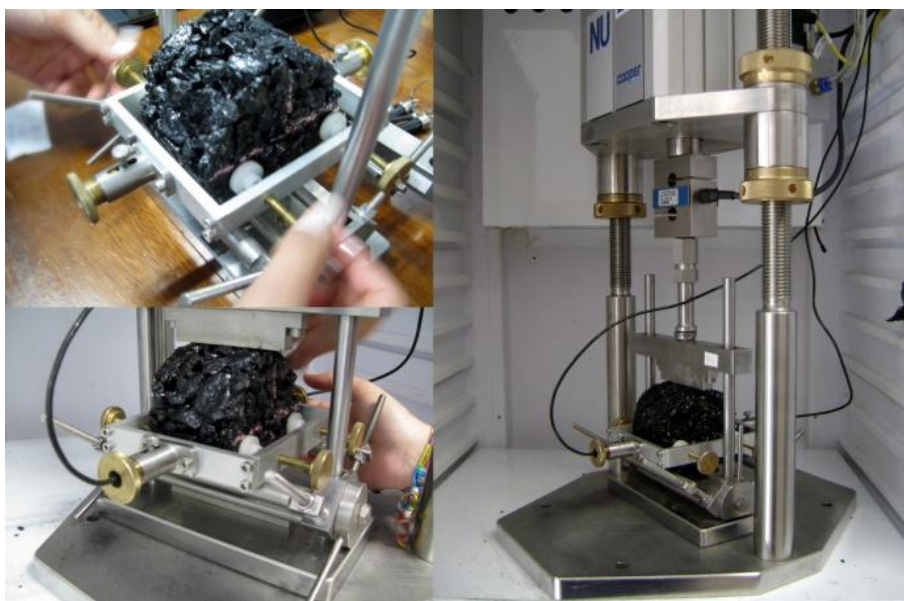


Figura 16: Representação do ensaio de tracção indirecta ou compressão diametral

Quadro 30: Módulo de rigidez das diferentes misturas através do ensaio de compressão diametral

Mistura	Módulo de rigidez (Mpa)
M10_90	959
M100	879
M80_20	1053
M70_30	740

3.3.7– BARIDADE

Para determinar a baridade dos provetes foi seguida a norma EN 12697-6 (2003). De acordo com a norma, para misturas porosas deve ser escolhido o procedimento C, no qual se procede à selagem do corpo de prova.



Figura 17: Corpo de prova antes e depois da selagem

A baridade foi obtida através da seguinte expressão:

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{\left(\frac{m_2 - m_3}{\rho_w}\right) - \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}\right)}$$

onde:

m_1 – Massa do provete seco (g)

m_2 – Massa do provete selado seco (g)

m_3 – Massa do provete selado dentro de água (g)

ρ_{sm} – Massa volúmica do material selante

Os resultados para a mistura, com variações do teor de betume, são apresentados no Quadro 31.

Quadro 31: Baridade da mistura para diferentes teores de betume

Mistura	Teor de betume (%)	Baridade (g/cm ³)
M100	3,5	1817
	3	1800
	2,5	1807
	2	1787

Tendo em conta que a mistura necessária para a realização do projecto necessita de um elevado número de vazios e que os valores do desgaste Cantabro com a variação de teor de betume não são significativos, foi adoptado um teor de betume de 2% para a conclusão do projecto.

3.4 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

A viscosidade da argamassa é a propriedade mais importante a ter em conta, uma vez que é um factor que vai influenciar a penetração da mesma nos vazios do esqueleto betuminoso e, conseqüentemente, o bom comportamento do pavimento após a cura. Se a argamassa não for suficientemente fluida haverá vazios por preencher, o que leva a uma falha prematura da camada, por outro lado, se tiver demasiada água pode ocorrer a segregação dos componentes da mistura.

Após a execução da argamassa, a impregnação no esqueleto poroso deve ser realizada imediatamente, evitando que diminua a sua trabalhabilidade. Enquanto é despejada deve ser mantida em movimento para evitar a segregação e a manutenção da fluidez.

Para a realização deste projecto foram utilizados dois tipos distintos de argamassas, com a finalidade de se poder obter uma comparação entre o uso da argamassa corrente de cimento Portland com um novo tipo de argamassa que é constituída por geopolímeros.

3.4.1 – ARGAMASSA DE CIMENTO

A argamassa de cimento utilizada neste projecto foi composta por cimento Portland, combinado com água e um superplastificante. Para a sua realização foram seguidos os seguintes aspectos:

- A relação água/cimento foi fixada em 1/3 da massa;
- Foi utilizado cimento Portland 42,5R;
- O superplastificante usado foi o Sika ViscoCrete 3000, cujo teor óptimo foi definido;
- A argamassa foi misturada até ficar homogénea, e imediatamente a seguir a sua fluidez foi testada através dos métodos do Cone de Marsh e de exsudação.

Foi escolhido o cimento Portland por ser muito corrente a sua utilização e porque reúne qualidades que o tornam apto para todos os trabalhos correntes da construção, como a elevada trabalhabilidade e o baixo calor de hidratação

O superplastificante adoptado no estudo, Sika ViscoCrete 3000, que está disponível em solução aquosa. Um superplastificante é definido como um material que, sem afectar a trabalhabilidade, permite uma redução da dosagem de água, ou que, sem mudar a dosagem de água, aumenta a trabalhabilidade.

Quadro 32: Dados do superplastificante Sika ViscoCrete 3000

Cor	Amarelada
Densidade	1,05 g/cm ³
Dosagem	1,0 a 2,0% do peso do cimento
Tempo de amassadura húmida	1 minuto
Constituição	Carboxilatos modificados

O procedimento utilizado na produção da argamassa foi o seguinte: coloca-se o cimento na misturadora e ligou-se a baixa velocidade, foi adicionada metade da água necessária continuando a mistura em velocidade lenta, acrescenta-se o superplastificante à água restante e adiciona-se batendo até ficar uma mistura homogénea.



Figura 18: Representação do método do Cone de Marsh

Para a medição da fluidez da argamassa foi utilizada a norma NP EN 445 (2000) recorrendo a dois métodos: o método do cone de Marsh e o método de exsudação, cujos resultados são apresentados no Quadro 33. Para a execução do primeiro, a mistura foi derramada no Cone de Marsh, com uma abertura de 10mm, e o tempo que foi necessário para um litro de argamassa fluir foi medido.

Quadro 33: Resultados dos ensaios de fluidez com variação do teor de superplastificante

Amostra	SP (%)	Método de Cone de Marsh (seg)	Método de exsudação (%)
1	0.5	Amostra demasiado espessa	0
2	1	56.71	0.375
3	1.5	33.88	1.25
4	2	24.99	1.25
5	2.5	34.91	7.5
6	3	30.42	10

Para a realização do teste de exsudação, colocaram-se 100mL de mistura num copo graduado, garantindo que não ocorria evaporação da água, e foi registado o volume de água à superfície após 3 horas. A percentagem de exsudação foi calculada com base na seguinte fórmula:

$$\frac{V_1}{V} \cdot 100\%$$

onde:

V_1 – Volume de água à superfície ao fim de 3 horas (mL)

V – Volume inicial (mL)

Com base nos resultados obtidos foi seleccionada a amostra 4 como sendo a mistura óptima a utilizar no estudo. Esta amostra contém na sua constituição cimento e água, numa proporção de 3 para 1 em massa, e 2% de superplastificante.

Foram então efectuados provetes (CIM) com base na constituição da amostra 4, de modo a proceder a ensaios de compressão, aos 28 dias. Os resultados individuais apresentam-se no Quadro 34, tendo-se calculado uma resistência à compressão média de 53,8 Mpa.

Quadro 34: Resistência à compressão da argamassa de cimento aos 28 dias

	Resistência à compressão (MPa)			
	Provete	A (mm ²)	F (N)	fc
CIM	1	1600	76900	48,1
	2	1600	53200	33,3
	3	1600	102900	64,3
	4	1600	78000	48,8
	5	1600	88600	55,4
	6	1600	102900	64,3
	7	1600	90800	56,8
	8	1600	93900	58,7
	9	1600	87100	54,4

3.4.1 – ARGAMASSA GEOPOLÍMERICA

A argamassa geopolimérica utilizada neste projecto foi composta por lamas residuais calcinadas, provenientes das minas da Panasqueira, combinadas com um activador composto por hidróxido de sódio (10M) e silicato de sódio. Foram tidos em conta os seguintes aspectos:

- A concentração do hidróxido de sódio é 10M;
- O silicato de sódio possui 49,33% de sílica;
- Razão silicato de sódio/hidróxido de sódio = 1;
- Razão precursor/silicato de sódio = 3

Para a obtenção das dosagens dos constituintes foi usado o software de cálculo AKAL, que foi desenvolvido nos laboratórios de compactação, e que calcula as dosagens de hidróxido e silicato de sódio de acordo com a massa de precursor, a concentração de hidróxido de sódio, as razões utilizadas e a composição química do precursor.



Figura 19: Materiais utilizados na argamassa geopolimérica

As lamas residuais, antes de calcinadas, foram moídas e peneiradas, de modo a obter uma amostra homogénea, permitindo um tratamento térmico uniforme. O tratamento térmico foi feito através de calcinação das lamas a 950°C, durante 2 horas, seguindo-se um arrefecimento brusco à temperatura ambiente. Seguidamente foi usado um moinho de bolas durante 6 horas para moer as lamas calcinadas. (João Centeio, 2010)

Para a produção da argamassa colocaram-se os activadores, o hidróxido de sódio e o silicato de sódio, no recipiente e misturaram-se até obter um líquido homogéneo, adicionou-se então o precursor mexendo-se manualmente até ficar uma mistura homogénea.

Para a medição da fluidez da argamassa foi utilizada a norma NP EN 445 (2000), usando o método do cone de Marsh. A mistura foi derramada no Cone de Marsh, com uma abertura de

10mm, e o tempo que foi necessário para um litro de argamassa fluir foi medido. Obteve-se um valor de 7min e 47seg, o que representa um valor muito elevado comparativamente com as pastas de cimento.



Figura 20: Ensaio do Cone de Marsh para argamassa geopolimérica

Foram então efectuados provetes (GEO) para proceder a ensaios de compressão aos 14 dias. Os resultados apresentam-se no Quadro 35, tendo-se calculado uma resistência à compressão média de 13,4 Mpa. Os valores de resistência obtidos são bastante inferiores aos valores obtidos para pastas de cimento, indicando que o processo de activação alcalina ainda está a decorrer.

Quadro 35: Resistência à compressão da argamassa geopolimérica aos 14 dias

	Resistência à compressão (MPa)			
	Provete	A (mm ²)	F (N)	fc
Geo	1	1600	20100	12,6
	2	1600	19400	12,1
	3	1600	22500	14,1
	4	1600	23600	14,8



Figura 21: Ensaio de compressão

3.6 – CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS BETUMINOSAS IMPREGNADAS

3.6.1 – PRODUÇÃO DE MISTURAS IMPREGNADAS

No presente projecto de pesquisa, foi utilizado como principal componente da mistura betuminosa o agregado granítico, tendo sido seleccionada a mistura M100, cuja granulometria pode ser observada no Quadro 36 e Figura 22, como mistura óptima, após comparação dos resultados de porosidade e da curva granulométrica. Esta mistura resulta apenas de agregados da brita 6/15. O betume escolhido para esta mistura foi o 50/70 e, como a principal característica do esqueleto era atingir o maior índice de vazios possível, foi utilizado o teor de betume óptimo de 2%. Foram ignorados nesta escolha os valores do desgaste Cantabro, uma vez que se revelaram pouco relevantes. Por fim foram adoptados dois tipos de argamassa para impregnar no esqueleto: a argamassa de cimento e a argamassa geopolimérica.

Quadro 36: Granulometria da mistura M100

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de Material Passado (%)
40,000	100,00
25,000	100,00
19,000	99,37
12,500	55,18
8,000	15,54
4,000	0,57
2,000	0,14
1,000	0,13
Material restante no fundo	0,00

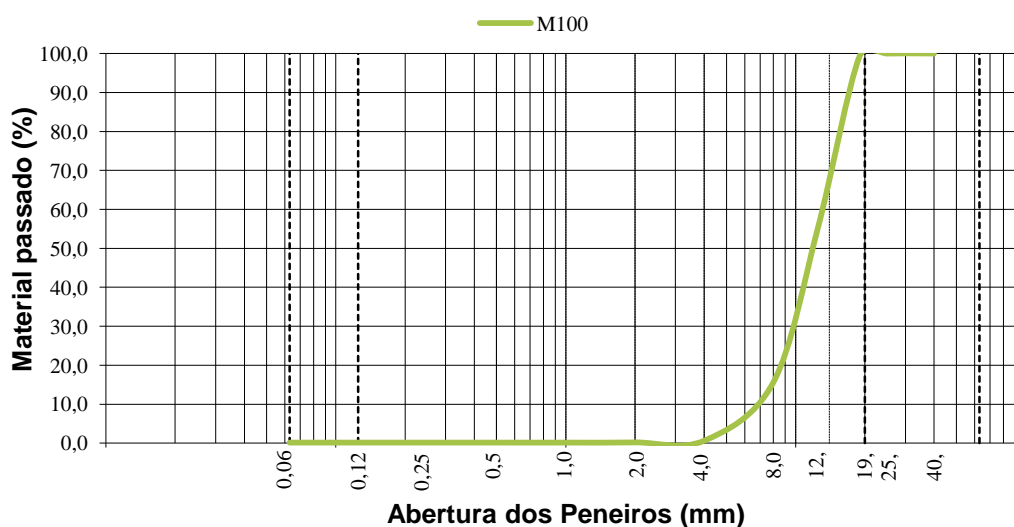


Figura 22: Curva granulométrica da mistura M100

Para a determinação das características deste tipo de pavimento foram construídas em laboratório quatro lajes quadradas com 30 cm de lado e 8 cm de altura. A mistura foi produzida com a ajuda de uma misturadora mecânica e compactada com um compactador de vibração.



Figura 23: Execução de uma laje de mistura betuminosa

Foram usadas duas lajes para a argamassa de cimento (GM-CIM), Figura 22, e as restantes duas para a argamassa geopolimérica (GM-GEO), Figura 23. A impregnação das argamassas ocorreu 24 horas após o fabrico da laje e seguiram-se 14 dias de cura em ambiente laboratorial.

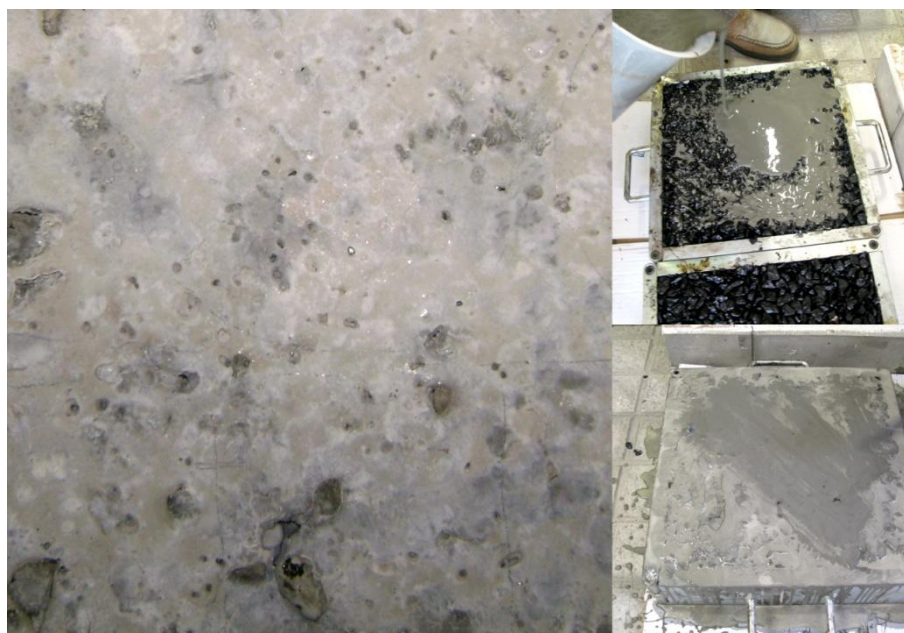


Figura 24: Pormenor da impregnação e do aspecto final da laje preenchida com argamassa de cimento (GM-CIM)



Figura 25: Pormenor da impregnação e do aspecto final da laje preenchida com argamassa geopolimérica (GM-GEO)

Após 7 dias de cura, procedeu-se à carotagem das lajes, obtendo-se 8 provetes cilíndricos e 10 cúbicos.



Figura 26: Pormenor dos provetes

3.6.2 – ENSAIO DE TRACÇÃO INDIRECTA

Uma das principais propriedades do asfalto para projecto de um pavimento é o seu módulo de rigidez. No entanto, chegou-se à conclusão que não existe um módulo de rigidez único, uma vez que este depende de variados factores como a temperatura, a carga e a ligação entre materiais. O ensaio de tracção indirecta é muito rápido e fácil e, por isso, é o mais utilizado. (ICE Manual of Construction Materials, 2009)

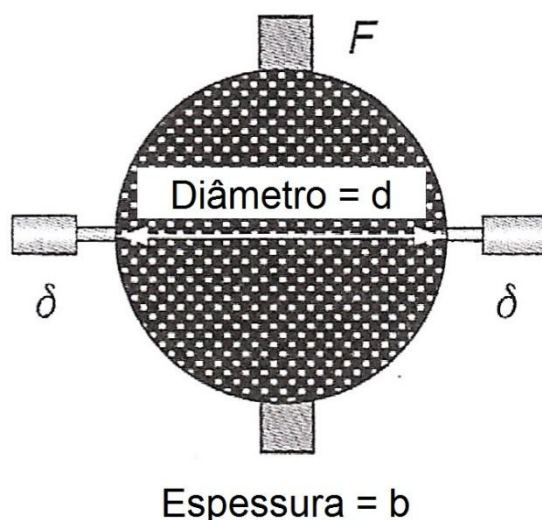


Figura 27: Esquema representativo do ensaio de tracção indirecta (ICE Manuals)

O ensaio de tracção indirecta ou de compressão diametral, realizado de acordo com a norma EN 12697-26 (2004), define o sistema de aplicação de cargas, com funcionamento hidráulico, uma célula de carga que mede o valor da força aplicada e transdutores do tipo LVDT localizados no plano horizontal, perpendicularmente ao plano de carga e colocados em posição diametralmente oposta.

Para a realização deste ensaio foi considerado um coeficiente de Poisson de 0,25, a 20°C. (Oliveira, 2006).

A tracção no provete é gerada por aplicação de cargas repetidas no plano perpendicular à direcção do carregamento e ao longo do plano diametral vertical. Este estado de tensão induz a deformação (δ) do provete. É registada a curva de deformação segundo a direcção diametral perpendicular ao plano de actuação da carga e a curva que corresponde ao impulso da força. Segundo a norma EN 12697-26 o valor recomendado para o tempo de crescimento da carga é de 124 ± 4 milissegundos (Marisa Dinis, 2010).

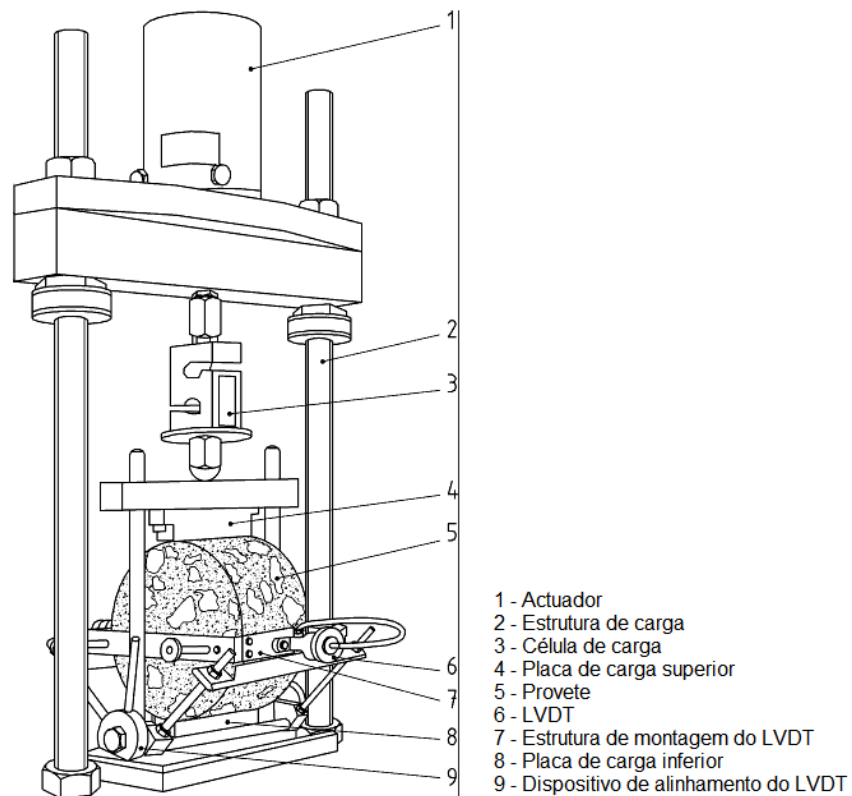


Figura 28: Ensaio de compressão diametral

Nestas condições o módulo de rigidez (E) é calculado pela equação:

$$E = \frac{F \cdot (\vartheta + 0,27)}{b \cdot \delta}$$

onde:

F – Amplitude da carga (N)

ϑ – Coeficiente de Poisson

b – Espessura do provete (mm)

δ – Deformação total (mm)

Procedeu-se à realização do ensaio usando 4 provetes de cada tipo, a uma temperatura de 20°C e aos 14 dias de cura. Os resultados encontram-se no Quadro 37.

Quadro 37: Módulo de rigidez aos 14 dias a uma temperatura de 20 °C

	Provete	Módulo de rigidez aos 14 dias (Mpa)	
GM-CIM	1	13952	14537
	2	14585	
	3	13623	
	4	15986	
GM-GEO	1	5971	5729
	2	6752	
	3	3834	
	4	6359	

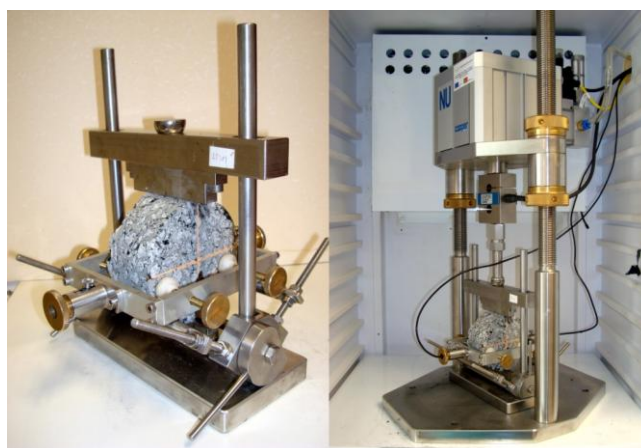


Figura 29: Pormenor do ensaio GM-CIM

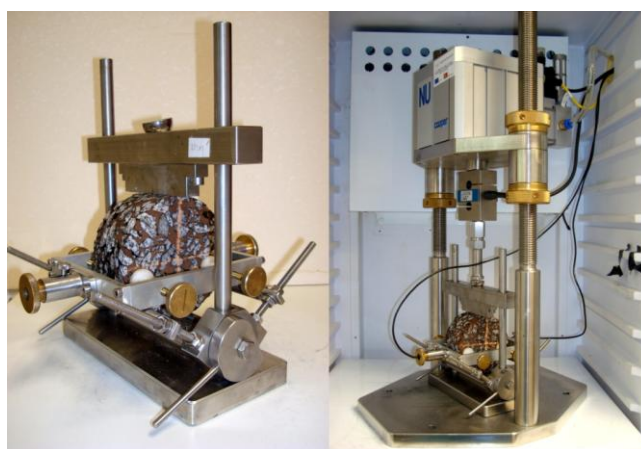


Figura 30: Pormenor do ensaio GM-GEO

O módulo de rigidez obtido para a mistura impregnada com argamassa de cimento é bastante elevado e aproxima-se bastante do obtido por Setyawan no seu estudo em 2003. Comparativamente com os resultados alcançados nas mesmas condições, em 2006, no projecto de Joel Oliveira estes resultados são significativamente melhores, podendo ser equiparados aos que o investigador obteve após envelhecimento do betume.

Relativamente à mistura impregnada com geopolímeros não existe termo de comparação para este tipo de ensaio, pode porém realçar-se que se aproximam dos valores obtidos por Joel Oliveira, em 2006, para as suas misturas antes de ocorrer o envelhecimento do betume.

3.6.3 – ENSAIO DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão foi realizado de acordo com a norma EN 12390-3 (2003). As superfícies da máquina de ensaio devem estar limpas, os provetes devem ser colocados no centro da base de teste e deve ser seleccionada uma velocidade constante de aplicação da carga entre 0,2 a 1,0 N/(mm²·s), neste caso, tendo em conta que os provetes cúbicos tinham 5cm de lado, a velocidade de carga aplicada foi de 1,5 N/(mm²·s).

A resistência à compressão (f_c) foi calculada pela expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

onde:

f_c – Resistência à compressão (MPa)

F – Carga máxima à rotura (N)

A_c – Área da secção transversal na qual a força de compressão foi aplicada (mm²)

Procedeu-se à realização do ensaio usando 6 provetes de cada tipo, a uma temperatura de 25°C e aos 14 dias de cura. Os resultados encontram-se no Quadro 38, tendo-se obtido uma resistência à compressão média de 13,3 MPa para GM-CIM e 5,5 MPa para GM-GEO. De acordo com estes resultados, verifica-se que a resistência à compressão das misturas com cimento é superior, em mais do dobro, da resistência das misturas com geopolímero.

Quadro 38: Resistência à compressão aos 14 dias

	Resistência à compressão (MPa)				
	Provete	Massa (g)	A _c (mm ²)	F (N)	F _c (MPa)
GM-CIM	1	295,7	2000	30100	15,1
	2	294,5	2000	22500	11,3
	3	306,5	2100	25300	12,0
	4	307,7	2100	26000	12,4
	5	295,3	2050	25300	12,3
	6	330,4	2500	41400	16,6
GM-GEO	1	269,5	2303	13600	5,9
	2	267,9	2160	11700	5,4
	3	272,9	2115	15000	7,1
	4	270,2	2115	11800	5,6
	5	273,9	2352	12000	5,1
	6	314,2	2500	9700	3,9

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

4.1 – Considerações finais	56
4.2 – Conclusões	56

4.1 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este projecto pretendeu-se estudar a composição e as propriedades de um pavimento semi-flexível usando dois tipos de ligantes.

Foi objecto de estudo a constituição da mistura betuminosa a usar no pavimento tendo-se chegado á conclusão que, uma vez que um dos factores que condicionava a mistura era a sua curva granulométrica e a sua porosidade, a melhor mistura a utilizar seria a que apenas continha agregado da brita 6/15 na sua constituição (M100). Uma vez que, apesar de importantes e relevantes, os valores do ensaio de desgaste Cantabro se revelarem pouco sensíveis, a escolha do teor de betume teve também por base a mistura que maior índice de vazios possuía, fixando-se em 2% a percentagem de betume.

A selecção da argamassa de cimento foi feita através da determinação da fluidez, uma vez que é o factor mais importante na construção deste tipo de pavimento. Se a argamassa não for suficientemente fluida, a sua penetração nos vazios do esqueleto será difícil. Assim sendo, foi seleccionada a amostra 4, que continha cimento e água, numa proporção de 3 para 1, e 2% de superplastificante.

Para a argamassa geopolimérica foi tido por base apenas os estudos efectuados por outros investigadores, tendo-se utilizado como precursor a lama residual das minas da Panasqueira calcinadas e como activadores hidróxido de sódio e silicato de sódio. Para obter uma mistura suficientemente fluida, que penetrasse no esqueleto betuminoso, foi usada uma razão unitária entre os activadores e uma razão de 3 para 1 entre o precursor e o silicato de sódio. O aumento da fluidez desta pasta está condicionada pela proporção de activadores, o que por sua vez, condiciona o ganho de resistência à compressão.

4.2 – CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objectivo geral o estudo laboratorial da composição e propriedades de misturas porosas impregnadas com geopolímeros, para pavimentos semi-flexíveis. Neste contexto, foram estudadas metodologias e propriedades de produção e caracterização da estrutura da mistura porosa, das pastas de cimento e geopolímero e da mistura impregnada.

No decorrer desta investigação foram registados algumas dificuldades tais como:

- Obter uma porosidade elevada na mistura betuminosa. Toda a revisão bibliográfica que foi feita identificava o intervalo entre 25 e 35% como sendo o óptimo para o índice de vazios do esqueleto. Tendo em conta que, para tornar o pavimento o mais económico possível, se partiu de três britas vindas da pedreira sem qualquer tratamento adicional

dos agregados, a máxima porosidade obtida foi de 26%, numa mistura que demonstra um desgaste muito elevado quando submetida ao ensaio Cantabro.

- Impregnar as argamassas no esqueleto. Apesar da mistura betuminosa ter um índice de vazios dentro dos parâmetros, houve dificuldades na penetração da argamassa para os preencher. Essa dificuldade foi maior quando se procedeu à realização das lajes com argamassa geopolimérica, o que é explicado por a fluidez desta argamassa ser menor em relação á argamassa de cimento.
- O tempo de presa da argamassa geopolimérica revelou-se muito curto, tendo havido por isso dificuldades na sua trabalhabilidade. Após a cura das lajes foi ainda possível observar que a argamassa ainda não tinha sofrido toda a activação.

Com a execução deste trabalho laboratorial foi possível constatar que as características da mistura impregnada com cimento apresenta melhores resultados que aquelas em que foram usados geopolímeros. É porém necessário ter em conta o facto da argamassa de cimento ter melhores propriedades que a argamassa geopolimérica estudada.

Através do ensaio de compressão diametral, o módulo de rigidez obtido para a mistura com argamassa de cimento é equivalente aos valores propostos por outros autores, o que pode estar relacionado com as propriedades da argamassa escolhida, que obteve um óptimo comportamento na resistência à compressão, cujos valores, que rondaram os 54 MPa (valor médio), foram em muito superiores aos da argamassa geopolimérica, que obteve valores na ordem dos 13 MPa (valor médio). Esse pode ser o facto primordial que condiciona o módulo de rigidez da mistura final. O módulo de rigidez obtido para a argamassa geopolimérica revela-se bastante inferior ao da argamassa de cimento, mas tendo em conta que por observação dos provetes se verificou que a argamassa não tinha sofrido uma activação a 100%, esse valor fica comprometido pelas dificuldades encontradas no decorrer do projecto.

No que diz respeito à resistência à compressão da mistura final é possível verificar que, novamente, a mistura com cimento obteve valores mais elevados que a mistura com geopolímero.

Tendo em conta as condições deste estudo e pela análise dos resultados que nele foram obtidos não é possível concluir que a impregnação com ligantes geopoliméricos seja vantajosa quando comparada com a utilização de cimento Portland. Porém, verifica-se a existência de um elevado potencial na utilização de ligantes alternativos ao cimento Portland, como o caso dos geopolímeros obtidos a partir de resíduos de minas que apresentam vantagens ambientais e económicas.

Finalmente, pretende-se que este estudo contribua para o desenvolvimento deste tipo de misturas e verifica-se assim a necessidade de prosseguir a exploração de vários aspectos desta técnica, nomeadamente:

- Desenvolver uma mistura betuminosa porosa com um maior índice de vazios que permita a melhor penetração da argamassa;
- Optimizar a argamassa geopolimérica de modo a controlar melhor o seu comportamento e propriedades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderton, G.L., 1996 "User's guide: Resin Modified Pavement." U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Estados Unidos da América.

Anderton, G.L., 2000: "Engineering Properties of Resin Modified Pavement (RMP) for Mechanistic Design." U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Estados Unidos da América.

Barbosa, T., 2006: "Reabilitação estrutural de um pavimento com camada drenante". Tese de Mestrado. Universidade do Minho, Braga, Portugal, Novembro.

Boundy, R., 1979: "Development of a Resin/Cement grouted coated Macadam Surfacing Material." M.Phil. thesis. University of Nottingham, Nottingham, Inglaterra.

Centeio, J., 2010: "Propriedades físicas de argamassa geopolimérica de lamas residuais das minas da Panasqueira". Tese de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, Outubro. 3rd European Symposium of "Performance and Durability of Bituminous Materials and Hydraulic Stabilised Composites", Leeds, Inglaterra.

Collop, A.C., Elliott, R.C., 1999: "Assessing the mechanical performance of Densiphalt".

Davidovits, J., 1999: "Chemistry of geopolymeric systems, Terminology. Proceedings of geopolymer". International Conference, França.

Densit a/s, 2000: "Densiphalt Handbook". Aalborg.

Dinis de Almeida, M., 2003: "Pavimentos rodoviários de baixo custo com emulsões betuminosas e resíduos das minas da Panasqueira". Tese de Mestrado. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, Dezembro.

Dinis de Almeida, M., 2010: "Caracterização e formulação de misturas betuminosas recicladas temperadas em central". Tese de Doutoramento. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, Dezembro.

Estradas de Portugal, 2009: "Caderno de encargos tipo obra", Capítulo 14.03 – Pavimentação. Estradas de Portugal, S.A., Portugal, Fevereiro.

Ferreira, C., 2009: "Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas". Tese de Mestrado. Universidade do Minho, Braga, Portugal, Dezembro.

Hassan, K. E., Setyawan, A, Zoorob, S. E.: "Effect of cementitious grouts on the properties of semi-flexible bituminous pavements". Balkema Publishers, Páginas 113-120

Oliveira, J., 2006: "Grouted Macadam – Material characterisation for pavement design". Tese de Doutoramento. Universidade de Nottingham, Nottingham, Inglaterra, Maio.

Oliveira, J., Sangiorgi, C., Fattorini G., Zoroob, S. E., 2009: "Investigating the fatigue performance of grouted macadams". Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Páginas 115-123, Maio.

Oliveira, J., Pais, J., Thom, N., Zoroob, S. E., 2007: "A study of the fatigue properties of grouted macadams". IJP, Volume 6, Páginas 112-123.

Rangan, B.V., 2009: "Engineering properties of geopolymer concrete, in Geopolymers: Structure, processing, properties and applications. Editado por John Provis e Jannie S.J. van Deventer, Woodhead Publishing Ltd., Páginas 211-226.

Setyawan, A., 2003: " Development of Semi-Flexible Heavy-Duty Pavements." PhD thesis, University of Leeds, Leeds, Inglaterra.

Torgal, F., Jalali, S., 2007: "Construção sustentável. O caso dos materiais de construção." Congresso Construção 2007, Coimbra, Portugal, Setembro.

Torgal, F., Castro Gomes, J., Jalali, S., 2008: "Investigations on mix design of tungsten mine waste geopolymeric binder". Construction and Building Materials, Volume 22, Páginas 1939-1949, Setembro.

Torgal, F., Castro Gomes, J., Jalali, S., 2008: "Investigations of tungsten mine waste geopolymeric binder: Strength and microstructure". Construction and Building Materials, Volume 22, Páginas 2212-2219, Novembro.

Zoroob, S. E., Hassan, K. E., Setyawan, A.: "Cold mix cold laid semi-flexible Grouted Macadams, mix design and properties". Balkema Publishers, Páginas 105-112.

ACERVO NORMATIVO

Normas portuguesas

NP EN 933-1:2000	Análise granulométrica. Metodo de peneiração.
NP EN 13108-1:2008	Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso.
NP EN 1097-6:2003	Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e absorção de água.
NP EN-445:2000	Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio.
NP EN 12390-3:2003	Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio.

Normas espanholas

NLT 168/90	Densidad y huecos en mezclas bituminosas compactadas.
------------	---

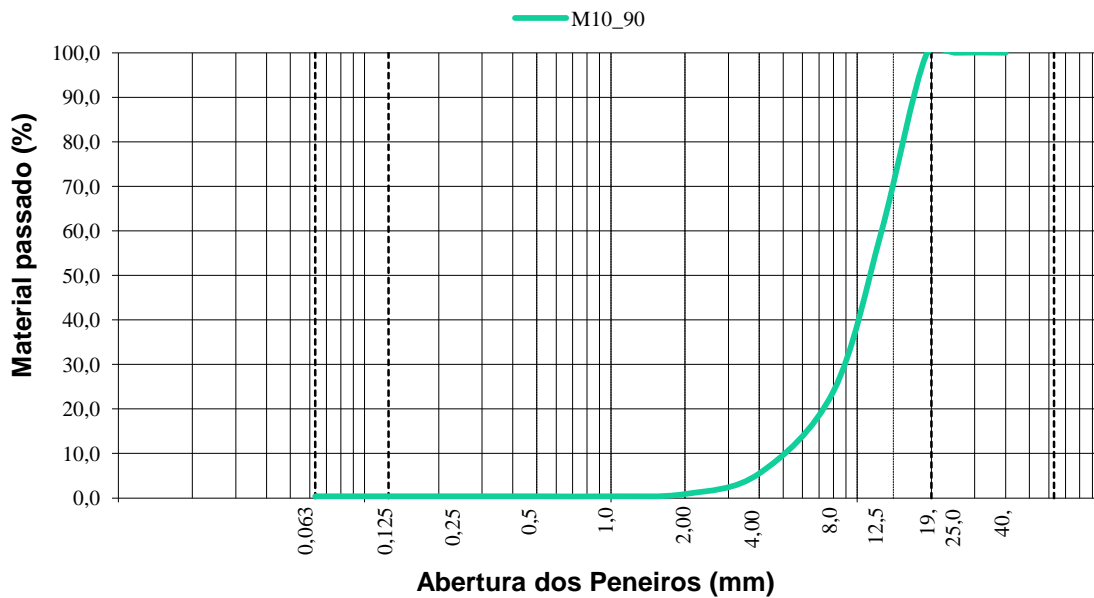
Normas europeias

EN 12390-3:2003	Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio
EN 12697-6:2003	Bituminous mixtures – Tests methods for hot mix asphalt – Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.
EN 12697-24:2004	Bituminous mixtures – Tests methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue.
EN 12697-26:2004	Bituminous mixtures – Tests methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness.
EN 12697-29:2003	Bituminous mixtures – Tests methods for hot mix asphalt – Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen.
EN 12697-30:2004	Bituminous mixtures – Tests methods for hot mix asphalt – Part 30: Specimen preparation by impact compactor.

ANEXOS

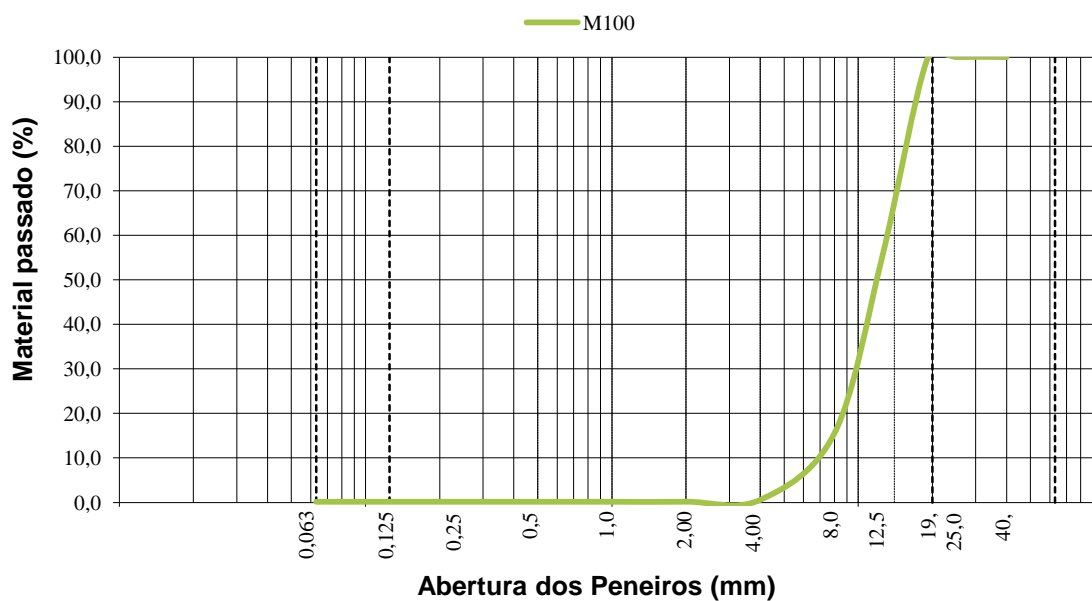
GRANULOMETRIA DA MISTURA BETUMINOSA M10_90

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de Material Passado (%)
	M10_90
40,000	100,00
25,000	100,00
19,000	99,43
12,500	59,66
8,000	23,99
4,000	5,53
2,000	0,90
1,000	0,39
Material restante no fundo	0,00



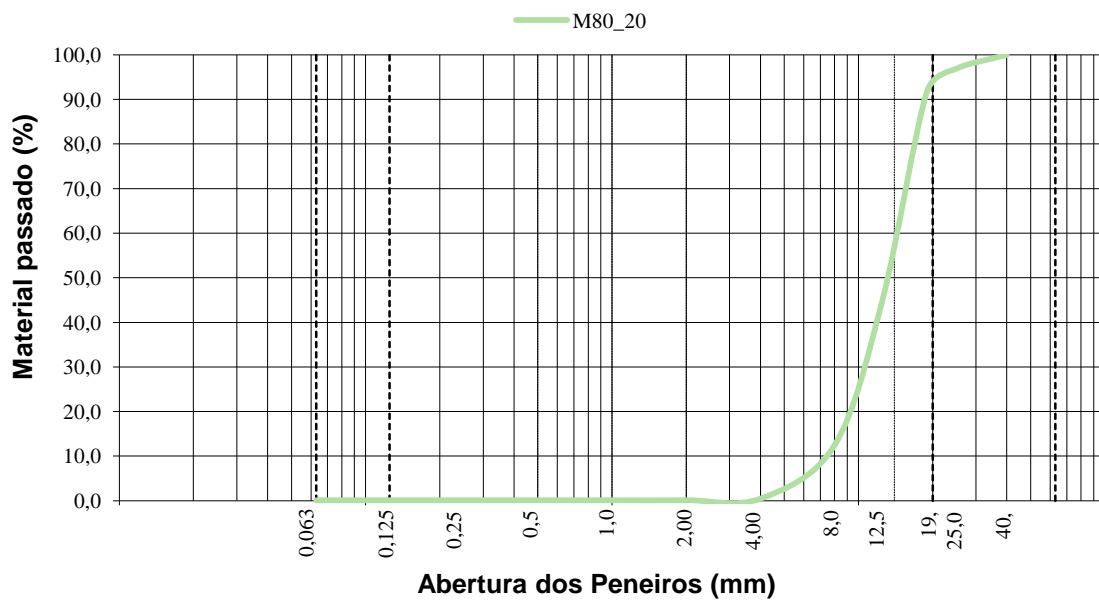
GRANULOMETRIA DA MISTURA BETUMINOSA M100

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de Material Passado (%)
	M100
40,000	100,00
25,000	100,00
19,000	99,37
12,500	55,18
8,000	15,54
4,000	0,57
2,000	0,14
1,000	0,13
Material restante no fundo	0,00



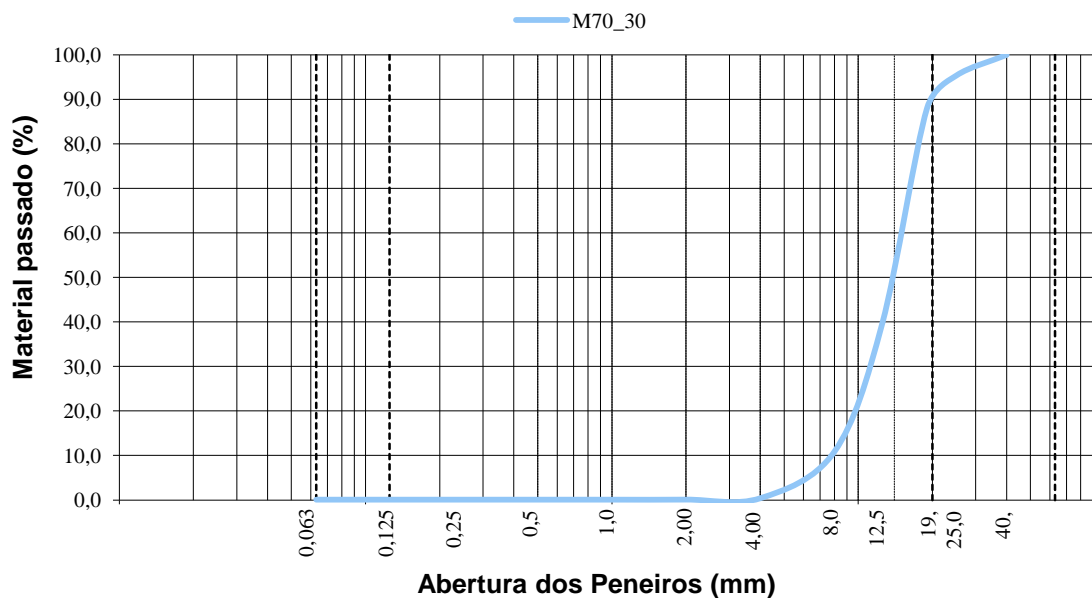
GRANULOMETRIA DA MISTURA BETUMINOSA M80_20

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de Material Passado (%)
	M80_20
40,000	100,00
25,000	96,91
19,000	91,80
12,500	44,83
8,000	12,44
4,000	0,46
2,000	0,12
1,000	0,10
Material restante no fundo	0,00



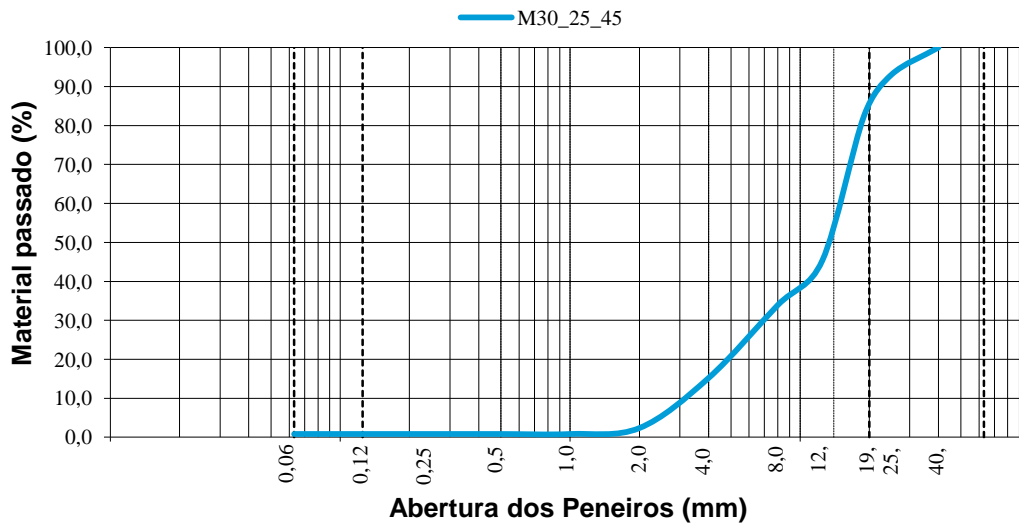
GRANULOMETRIA DA MISTURA BETUMINOSA M70_30

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de Material Passado (%)
	M70_30
40,000	100,00
25,000	95,36
19,000	88,02
12,500	39,66
8,000	10,90
4,000	0,41
2,000	0,10
1,000	0,09
Material restante no fundo	0,00



GRANULOMETRIA DA MISTURA BETUMINOSA M30_25_45

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de Material Passado (%)
	M30_25_45
40,000	100,00
25,000	93,04
19,000	82,53
12,500	45,34
8,000	33,91
4,000	15,20
2,000	2,35
1,000	0,84
Material restante no fundo	0,00



POROSIDADE

	d	h médio	A	V	Dap	T1	d1	T2	d2	T3	d3	Tb	db	Dmáx	P(%)	
M10_90 4,0%	10,14	7,4	1160,2	595,56	1,95	28,85	2,7	67,31	2,7	-	-	3,85	1,04	2,54	23,42	24
	10,14	7,0	1109,0	567,30	1,95										23,15	
	10,14	7,1	1101,9	573,36	1,92										24,45	
M10_90 3,5%	10,14	7,1	1114,6	573,36	1,94	28,99	2,7	67,63	2,7	-	-	3,38	1,04	2,56	24,12	24
	10,14	7,2	1119,0	581,43	1,92										24,87	
	10,14	7,2	1130,4	581,43	1,94										24,11	
M100 4,0%	10,14	7,2	1129,3	581,43	1,94	-	-	96,15	2,7	-	-	3,85	1,04	2,54	23,64	25
	10,14	7,4	1137,9	599,60	1,90										25,39	
	10,14	7,4	1132,8	597,58	1,90										25,48	
M100 3,5%	10,14	7,1	1120,2	573,36	1,95	-	-	96,62	2,7	-	-	3,38	1,04	2,56	23,19	24
	10,14	7,3	1122,3	589,51	1,90										25,16	
	10,14	7,4	1143,8	597,58	1,91										24,75	
M100 3,0%	10,14	7,4	1130,8	593,54	1,91	-	-	97,09	2,7	-	-	2,91	1,04	2,58	25,10	25
	10,14	7,3	1124,2	591,53	1,90										25,29	
	10,14	7,3	1127,0	587,49	1,92										24,58	
M100 2,5%	10,14	7,1	1097,0	575,37	1,91	-	-	97,56	2,7	-	-	2,44	1,04	2,60	25,05	25
	10,14	7,2	1114,7	583,45	1,91										24,89	
	10,14	7,3	1117,5	585,47	1,91										24,96	
M100 2,0%	10,14	7,3	1115,2	589,51	1,89	-	-	98,04	2,7	-	-	1,96	1,04	2,62	25,63	26
	10,14	7,3	1123,4	589,51	1,91										25,08	
	10,14	7,4	1121,3	597,58	1,88										26,23	
M80_20 4,0%	10,14	7,4	1134,6	595,56	1,91	-	-	76,92	2,7	19,23	2,7	3,85	1,04	2,54	25,11	25
	10,14	7,2	1107,1	581,43	1,90										25,14	
	10,14	7,3	1129,1	585,47	1,93										24,18	
M70_30 3,5%	10,14	6,7	1032,2	541,05	1,91	-	-	67,31	2,7	28,845	2,7	3,85	1,04	2,54	25,00	25
	10,14	6,6	1032,4	532,98	1,94										23,85	
	10,14	6,7	1040,8	543,07	1,92										24,66	
M30_25_45 5,0%	10,14	7,1	1164,2	573,36	2,03	28,57	2,7	23,81	2,7	42,86	2,7	4,76	1,04	2,49	18,60	17
	10,14	6,9	1173,6	559,22	2,10										15,87	
	10,14	7,1	1165,4	569,32	2,05										17,94	
M30_25_45 4,5%	10,14	6,7	1101,4	539,04	2,04	28,71	2,7	23,92	2,7	43,06	2,7	4,31	1,04	2,51	18,63	19
	10,14	7,0	1129,7	565,28	2,00										20,41	
	10,14	6,9	1150,7	557,20	2,07										17,76	
M30_25_45 4,0%	10,14	6,9	1158,9	555,19	2,09	28,85	2,7	24,04	2,7	43,27	2,7	3,85	1,04	2,53	17,43	18
	10,14	6,9	1141,0	557,20	2,05										19,00	
	10,14	6,8	1153,3	549,13	2,10										16,93	
M30_25_45 3,5%	10,14	6,9	1127,5	555,19	2,03	28,99	2,7	24,16	2,7	43,48	2,7	3,38	1,04	2,55	20,23	20
	10,14	6,8	1118,6	549,13	2,04										19,99	
	10,14	6,8	1129,2	551,15	2,05										19,53	

	d	h médio	A	V	Dap	T1	d1	T2	d2	T3	d3	Tb	db	Dmáx	P(%)	
M30_25_45 3,0%	10,14	6,9	1113,1	557,20	2,00	29,13	2,7	24,27	2,7	43,69	2,7	2,91	1,04	2,56	22,09	21
	10,14	6,7	1100,1	543,07	2,03										21,00	
	10,14	6,5	1078,5	526,92	2,05										20,17	
M30_25_45 2,5%	10,14	7,0	1119,8	561,24	2,00	29,27	2,7	24,39	2,7	43,90	2,7	2,44	1,04	2,58	22,74	22
	10,14	6,9	1132,5	557,20	2,03										21,29	
	10,14	6,9	1111,0	555,19	2,00										22,51	
M30_25_45 2,0%	10,14	6,8	1120,5	549,13	2,04	29,41	2,7	24,51	2,7	44,12	2,7	1,96	1,04	2,60	21,56	22
	10,14	6,9	1134,2	555,19	2,04										21,47	
	10,14	6,5	1057,2	526,92	2,01										22,87	