

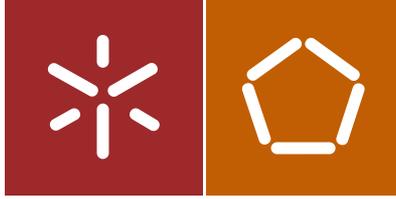


José Maria Carvalho Belo Ximenes

Conceção de um Betão Drenante para Pavimentos Rígidos

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Maria Carvalho Belo Ximenes

Conceção de um Betão Drenante para
Pavimentos Rígidos

Tese Doutoramento
Programa Doutoral em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor José Luís Barroso Aguiar
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais

Junho, 2023

Declaração da integridade e Moto do trabalho

Eu, José Maria Carvalho Belo Ximenes, autor da presente tese, declaro ter atuado com integridade na sua elaboração. Confirmando que em todo o trabalho conducente à sua elaboração não recorreu à prática de plágio ou a qualquer forma de falsificação dos dados.

Por este meio declaro que tomei conhecimento integral do código de conduta Ética e moral da religião, família e da Universidade do Minho.

MOTTO DO TRABALHO

Dedico este trabalho a minha esposa e filhos pela inspiração, motivação e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus,

Pelo constante presença, reconforto e motivação.

À minha família,

Eu agradeço à minha primeira esposa Umbelina da Costa Alves (em memória) e meu filho Valderico Ucaze de Lima Ximenes e à segunda esposa Mafalda da Silva Freitas e meus filhos Dilbugati Ucaze Mafalda Maria Ximenes, Dânio Ucazem de Jesus Ximenes, Damenigio Ucazem de Jesus Ximenes, Norberto Ucazem Ximenes, pelo apoio durante esta mudança para Portugal e por todos os momentos difíceis passados.

Aos meus irmãos Joaquim Ximenes, Victor da S. Belo Ximenes, Marina Maria Ximenes (em memória), Afonso Faculto Soares, Faustino Ximenes (em memória), António S C Ximenes (em memória), Justino Ximenes, Elizário de Jesus Ximenes, João Maria Ximenes, Flávio Maria de Jesus Ximenes, Leopoldina Maria do Rosário Ximenes e Francelino de Jesus Ximenes, que apesar de distantes sempre me deram forças para continuar. Aos meus sobrinhos, sobrinhas, sogros, netos, pelo amor e respeito.

Aos meus orientadores,

Ao meu tutor e ao mesmo tempo primeiro orientador,

Professor Doutor José Luís Barroso Aguiar

e segundo orientador,

Professor Doutor Jorge Carvalho Pais,
por aceitar em orientar este trabalho.

A todos os Professores da Universidade do Minho,

Pelas palavras de confiança, coragem e esperança.

Aos técnicos dos laboratórios da Universidade do Minho,

Em especial ao Engenheiro Carlos de Jesus pela ajuda no decorrer dos ensaios da tese e ao Engenheiro Carlos Palha pela ajuda prestada nos trabalhos de laboratório.

Aos meus colegas de trabalho, sobretudo aos grupos do Laboratório de Engenharia Civil, expresso o meu profundo agradecimento pela cooperação ao longo desta caminhada, a todos vocês, José Gonçalves, Fernando Pokee, Rui Oliveira, António Matos, Marco Jorge, Hélder Torres, Cesar Gonçalves e Graciano Fernandes.

Ao Governo de Timor-Leste e Portugal,

Pelo plano da cooperação de formações dos professores de UNTL (Universidade Nacional de Timor Lorosa'e) e Universidade do Minho de Portugal.

Pelo apoio e financiamento deste Doutoramento.

Ao Tony Lavender que assume o cargo coordenador deste protocolo,

Pela sensibilidade e humildade sempre demonstradas.

Aos meus amigos timorenses,

Pelo apoio moral e verdadeira amizade.

Aos Colegas da classe e dos grupos de trabalho,

Pela ajuda, carinho e respeito durante este programa de doutoramento na Universidade do Minho realizado em Guimarães.

A todas as pessoas,

Que direta ou indiretamente me ajudaram na realização deste programa de doutoramento que culminou com a Tese de Doutoramento.

Uma última palavra:

Muito obrigado a todos.

RESUMO

Os pavimentos das estradas são normalmente construídos com betões asfálticos que devido ao crescente custo do petróleo e ao aumento dos volumes de tráfego deixam de ser competitivos comparativamente aos betões de cimento, principalmente numa estratégia de custo do ciclo de vida das estradas.

Além disto, atualmente há uma preocupação em termos de segurança rodoviária que tem levado à adoção de camadas superficiais dos pavimentos que rapidamente escoem a água da chuva e aumentem a aderência pneu-pavimento através da sua macrotextura.

Assim, este trabalho tem por objetivo conceber um betão de cimento drenante para aplicação em camadas superficiais de pavimentos rodoviários, o que necessita do conhecimento de características físicas e mecânicas destes materiais e dos seus constituintes. Atendendo aos princípios da sustentabilidade, serão incorporados resíduos da construção e demolição no betão drenante a desenvolver.

Com objetivo de avaliar o comportamento de betão de cimento drenante, apresenta-se a campanha de ensaios experimentais realizada com materiais de acordo com o Caderno de Encargos da administração rodoviária. Os betões foram concebidos, obedecendo a um determinado fuso granulométrico com um agregado específico para betões asfálticos drenantes referido nesse documento, designado por PA 12,5.

A principal propriedade na conceção dos betões é a relação água-ligante e a vibração aplicada, pelo que estas propriedades tiveram influência na distribuição de porosidade das amostras compactadas gerando uma distribuição de permeabilidade para as diferentes formulações. A distribuição da porosidade nos diferentes betões demonstrou ter uma correlação direta com a permeabilidade das amostras bem como uma uniformização.

A investigação dos diversos fatores possibilitou a escolha de um betão drenante com resíduos de construção e demolição otimizado para aplicação em pavimentação, de forma a colmatar zonas com difícil escoamento e prevenindo de alguma forma os resultados das alterações climáticas.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentos rodoviários rígidos, Betão drenante; Resíduos de construção e demolição; Permeabilidade; Características mecânicas; Características superficiais.

ABSTRACT

Road pavements are normally built with asphalt concrete which, due to the increasing cost of crude-oil and the traffic increase, are no longer competitive compared to cement concrete, mainly in a strategy of cost of the life cycle of roads.

In addition, there is currently a concern in terms of road safety that has led to the adoption of surface layers of pavements that quickly drain rainwater and increase tire-pavement adhesion through its macrotexture.

Thus, this work aims to design a porous concrete for application in surface layers of road pavements, which requires knowledge of the physical and mechanical characteristics of these materials and their constituents. In line with sustainability principles, construction and demolition waste will be incorporated into the draining concrete.

To evaluate the behavior of porous concrete, the campaign of experimental tests carried out with materials in accordance with the specifications of the road administration is presented. The porous concretes were designed, following a specific aggregate granulometric curve used for asphalt concrete referred to as PA 12.5.

The main property in the design of concrete is the water-binder ratio and the applied vibration, so these properties had an influence on the porosity distribution of the compacted samples generating a permeability distribution for the different formulations. The porosity distribution in the different concretes showed to have a direct correlation with the permeability of the samples as well as a uniformity.

The investigation of the different factors made it possible to choose a drainage concrete optimized for application in paving for different purposes and in different places, to fill areas with difficult flow and to prevent in some way the results of climate change.

KEYWORDS: Rigid Road pavements; Porous concrete; Construction and demolition waste; Permeability; Mechanical characteristics; Surface characteristics.

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO	1
1.2. JUSTIFICAÇÃO DO TEMA E A SUA IMPORTÂNCIA.....	6
1.3. MOTIVAÇÃO	8
1.4. OBJECTIVOS	9
1.5. METODOLOGIA	9
1.6. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	10
2. REVISÃO DO ESTADO DE ARTE	12
2.1. OS PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS	13
2.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PAVIMENTOS	13
2.3. TIPOS DE PAVIMENTOS	14
2.3.1. Pavimentos flexíveis	14
2.3.2. Pavimentos rígidos	15
2.3.3. Pavimentos semirrígidos	15
2.4. BETÕES COM LIGANTES HIDRÁULICOS.....	16
2.4.1. Betão de cimento	17
2.4.2. Betão pobre	17
2.4.3. Agregado de granulometria extensa estabilizado com cimento	17
2.4.4. Solos estabilizados com cal ou cimento	18
2.5. CONSTITUIÇÃO E MODO DE COMPORTAMENTO DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	18
2.5.1. Pavimento de betão vibrado	20
2.5.2. Pavimento de betão armado	21
2.5.3. Pavimento de betão pré-esforçado	21
2.5.4. Pavimentos formados por elementos prefabricados.....	21
2.6. CONSTITUIÇÃO E MODO DE COMPORTAMENTO DOS PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS.....	22
2.7. BETÃO.....	25
2.7.1. Classificação	26

2.7.2. Classes de exposição	28
2.7.3. Classificação segundo a resistência à compressão	31
2.7.4. Classificação segundo a densidade	33
2.8. CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A	
TRABALHABILIDADE	35
2.9. CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A DURABILIDADE.....	37
2.10. UTILIZAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO.....	39
2.11. BETÕES DRENANTES	41
2.11.1. Juntas em pavimentos rodoviários de betão	42
2.11.2. Capacidade de rolamento	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO	47
3.1. PLANO DE TRABALHOS	47
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS.....	49
3.2.1. Cimento	50
3.2.2. Agregados naturais	50
3.2.3. Agregados reciclados	52
3.2.4. Água	53
3.3. COMPOSIÇÃO DOS BETÕES DRENANTES	54
3.3.1. Betão com agregados naturais	54
3.3.2. Betão com agregados naturais e a quantidade de cimento de 300 kg/m ³	57
3.3.3. Betão com agregados reciclados	57
3.4. ENSAIOS AOS BETÕES FRESCOS.....	60
3.4.1. Ensaio de abaixamento	61
3.4.2. Ensaio de vêbê.....	61
3.4.3. Ensaio de espalhamento	62
3.4.4. Ensaio de massa volúmica e determinação do teor de ar do betão fresco	63
3.5. ENSAIOS AOS BETÕES ENDURECIDOS.....	64
3.5.1. Ensaio de permeabilidade com permeâmetro LCS.....	64
3.5.2. Ensaio de permeabilidade com permeâmetro Falling Head	65
3.5.3. Ensaio de absorção por imersão	67
3.5.4. Ensaio de determinação da absorção da água por capilaridade	68

3.5.5. Avaliação da porosidade através de imagem	69
3.5.6. Ensaio de resistência à compressão.....	70
3.5.7. Ensaio de resistência à tração.....	71
3.5.8. Ensaio da resistência à flexão	71
3.5.9. Ensaio de modulo de elasticidade em compressão	72
3.5.10. Ensaio da resistência ao desgaste.....	73
3.5.11. Ensaio da perda de massa por imersão do sulfato magnésio	75
3.5.12. Ensaio de gelo/degelo	76
3.5.13. Ensaio de medição da textura.....	77
3.5.14. Ensaio de determinação do coeficiente de resistência ao deslizamento com o pêndulo britânico.....	79
3.5.15. Ensaio de módulo dinâmico	81
3.5.16. Ensaio de resistência à fadiga	81
4. CONCEÇÃO DE BETÃO DRENANTE	82
4.1. ESTUDOS PRELIMINARES DE CONCEÇÃO DE BETÃO DRENANTE.....	82
4.1.1. Abaixamento e vêbê	83
4.1.2. Espalhamento	84
4.1.3. Massa volúmica fresca e teor de ar	85
4.1.4. Permeabilidade do KLCS.....	86
4.1.5. Absorção de água por imersão	87
4.1.6. Porosidade de imagem	88
4.1.7. Resistência à compressão	90
4.1.8. Resistência à tração	91
4.1.9. Abrasão por cântabro	92
4.1.10. Consideração final.....	93
4.2. CONCEÇÃO DE BETÃO DRENANTE COM 300 KG CIMENTO /M³.....	93
4.2.1. Abaixamento e vêbê	94
4.2.2. Massa volúmica fresca	94
4.2.3. Permeabilidade com o permeâmetro LCS.....	95
4.2.4. Permeabilidade com o permeâmetro FH.....	98

4.2.5. Absorção de água por imersão	100
4.2.6. Resistência à compressão	103
4.2.7. Abrasão por cântabro	105
4.2.8. Consideração final.....	107
4.3. CONCEÇÃO DE BETÃO DRENANTE COM AGREGADOS RECICLADOS	107
4.3.1. Abaixamento e vêbê	107
4.3.2. Massa volúmica fresca	108
4.3.3. Determinação do teor de ar	109
4.3.4. Permeabilidade KLCS	110
4.3.5. Permeabilidade KFH	112
4.3.6. Absorção de água por imersão	113
4.3.7. Absorção de água por capilaridade	114
4.3.8. Resistência à compressão	116
4.3.9. Resistência à tração	117
4.3.10. Resistência à flexão	118
4.3.11. Desgaste por cântabro	119
4.3.12. Resistências ao sulfato magnésio	120
4.3.13. Módulo de elasticidade.....	122
4.3.14. Gelo/degelo	123
4.3.15. Volume vazios do betão drenante	124
4.3.16. Profundidade média da textura.....	125
4.3.17. Resistência ao deslizamento.....	126
4.3.18. Textura da superfície do betão	127
4.3.19. Módulo dinâmico	129
4.3.20. Resistência à fadiga.....	130
4.3.21. Consideração final.....	135
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	136
5.1. CONCLUSÕES	136
5.2. TRABALHOS FUTUROS.....	138
6. ARTIGOS PUBLICADO E SUBMETIDOS.....	140
6.1.1. Artigo Publicado	140
6.1.2. Artigos Submetidos	140

6.1.3. Artigos não Submetidos	140
6.1.4. Conferencia e Congressos Internacionais (em Português e Inglês).....	140
6.1.5. Congressos Construção Internacional (em Português)	141
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Constituição de um pavimento rígido [24].....	19
Figura 2. 2 Tipos de pavimentos rígidos [24]	20
Figura 2. 3 Constituição do pavimentos semirrígidos: a) Sem base granular; b) Com base granular [35].....	23
Figura 2. 4 Classes de exposição de acordo com as zonas em que se aplica determinado tipo de betão [38]	29
Figura 2. 5 Classes de exposição para habitações e serviços [38]	29
Figura 2. 6 Tipos de classes de exposição para edificios comerciais e industriais [38]	30
Figura 2. 7 Tipos de classes de exposição para obras de arte e infraestruturas [38].....	30
Figura 2. 8 Classes de exposição correntes para obras marítimas [38]	31
Figura 2. 9 Tipos de provetes para ensaios de resistência à compressão	33
Figura 2. 10 Percentagem de alguns resíduos da construção e demolição na comunidade europeia [47]	40
Figura 2. 11 Agregado reciclado de peças pré-moldadas de betão.....	40
Figura 2.12 Juntas transversais de retração serrado [52]	43
Figura 2. 13 Juntas transversais de retração aberta no betão fresco [52]	43
Figura 2. 14 Largura e comprimento recomendados para laje de pavimento rodoviária de betão [52].....	45
Figura 2. 15 Distribuição de tensões verticais e horizontais devido a rodas [24].....	46
Figura 3. 1 A) Distribuição granulométrica dos três agregados naturais, B) BN-REF.....	51
Figura 3. 2 Distribuição granulométrica dos betões com agregados reciclados.....	53
Figura 3. 3 Limite máximo, mínimo do fuso granulométrico do betão drenante PA 12.5	54
Figura 3. 4 Fuso granulométrico e granulometria utilizada para o betão drenante	56
Figura 3. 5 Fusos granulométricos do betão de BN-REF e B-RCD.....	58
Figura 3. 6 Fusos granulométricos do Tamanho N8 [57]	59
Figura 3. 7 Fusos granulométricos Tamanho N89 [58].....	60
Figura 3. 8 Provetes produzidos para aos ensaios.....	61
Figura 3. 9 Permeâmetro LCS utilizado nos ensaios de permeabilidade [64]	65
Figura 3. 10 Ilustração (A) [67] e equipamento de ensaio (B).....	67
Figura 3.11 Provetes e equipamentos de ensaios de absorção de água por imersão [69] [70]	67
Figura 3. 12 Provetes e recipiente do ensaio de capilaridade	69

Figura 3. 13 Fases para a determinação da porosidade através de imagem.....	70
Figura 3. 14 Máquina da Resistência à Compressão (A), e balança (B).....	70
Figura 3. 15 Ensaio de resistência à tração	71
Figura 3. 16 Máquina do ensaio de resistência à flexão.....	72
Figura 3. 17 Ensaio de módulo de elasticidade	73
Figura 3. 18 Máquina de Los Angeles (A) [77] e os provetes ensaiados (B).....	74
Figura 3. 19 Proвете no início (A), e recipiente com provete imerso no sulfato magnésio (B)	76
Figura 3. 20 Equipamentos (A) e colocação dos provetes de gelo degelo (B).....	77
Figura 3. 21 As características dos quatro provetes de Referência e betão de RCD.....	77
Figura 3. 22 Ensaio de mancha de areia [84].....	78
Figura 3. 23 Equipamento laser utilizado no ensaio de textura.....	79
Figura 3. 24 Pêndulo Britânico [85]	80
Figura 3. 25 Máquina do ensaio de fadiga	81
Figura 4.1 A) Ensaio de abaixamento, B) Ensaio de vêbê.....	83
Figura 4.2 Equipamento (A) e medição do espalhamento (B)	84
Figura 4. 3 Percentagem de ar em função da massa volúmica do betão fresco.....	86
Figura 4. 4 Ensaio de permeabilidade KLCS	86
Figura 4. 5 Resultado média dos ensaios de permeabilidade de KLCS.....	87
Figura 4. 6 Absorção de água por imersão	87
Figura 4. 7 Imagens utilizadas para avaliação da porosidade com suporte em imagem.....	88
Figura 4. 8 Porosidade através de imagem.....	89
Figura 4. 9 Relação da porosidade através de imagem com a obtido por absorção de água por imersão	90
Figura 4. 10 Relação entre a permeabilidade K_{H} e a resistência à compressão.....	91
Figura 4. 11 Resultado dos ensaios da média de tração	92
Figura 4. 12 Abrasão por cântabro dos betões.....	93
Figura 4. 13 Variação da massa volúmica fresca com a razão água/cimento dos betões com agregados naturais	95
Figura 4. 14 Ensaio de permeabilidade LCS em cubos (A) e lajetas (B) e (C) resultado	95
Figura 4. 15 Permeabilidade com permeâmetro KLCS em cubos	96
Figura 4. 16 Permeabilidade KLCS medida nas lajetas de betão com agregados naturais	97
Figura 4. 17 Permeabilidade Falling Head dos betões com agregados naturais.....	98
Figura 4. 18 Permeabilidade KFH função da razão A/C	99
Figura 4. 19 Os resultados da permeabilidade KFH	99
Figura 4. 20 Corelação da permeabilidade obtida pelo KLCS e KFH.....	100
Figura 4. 21 Volume de vários dos betões com agregados naturais.....	102

Figura 4. 22 Resistência à compressão dos betões com agregados naturais	103
Figura 4. 23 Relação da resistência à compressão e a porosidade por imersão	104
Figura 4. 24 Comparação da permeabilidade FH com a resistência da compressão dos betões com agregados naturais	105
Figura 4. 25 Resultados do ensaio de abrasão por cântabro da quantidade de cimento 300 kg/m ³	105
Figura 4. 26 Correlação dos resultados de abrasão por cântabro e a resistência à compressão	106
Figura 4. 27 Resultados do ensaio de vêbê com agregado reciclado	108
Figura 4. 28 Resultados dos ensaios da massa volúmica do betão fresco	109
Figura 4. 29 Resultados dos ensaios de Teor de Ar	110
Figura 4. 30 Coeficiente da permeabilidade K_{cs} dos betões com agregados reciclados.....	111
Figura 4. 31 Resultados dos ensaios de permeabilidade de lajes	112
Figura 4. 32 Média da permeabilidade KFH	113
Figura 4. 33 Absorção da água por imersão de 28 dias	114
Figura 4. 34 Absorção da água por capilaridade	115
Figura 4. 35 Absorção da água por capilaridade	115
Figura 4. 36 Resultado do ensaio da resistência à compressão com B-RCD dos 28 dias de idade	117
Figura 4. 37 Resistência à tração dos betões com agregados reciclados.....	117
Figura 4. 38 Resultados dos ensaios de flexão de 28 dias	119
Figura 4. 39 Resultado da perda da massa por cântabro.....	120
Figura 4. 40 Resistência ao sulfato magnésio após 25 ciclos	121
Figura 4. 41 Módulo de elasticidade dos betões com agregados reciclados.....	122
Figura 4. 42 Perda da massa no ensaio de gelo/degelo	123
Figura 4. 43 Aspeto dos provetes do ensaio de gelo/degelo: No início do ensaio (A); no ciclo 70 (B); no ciclo 82	124
Figura 4. 44 Volume vazios dos betões com agregados reciclados	124
Figura 4. 45 Ensaio de mancha de areia	125
Figura 4. 46 Profundidade média da textura dos betões com agregado reciclado	125
Figura 4. 47 Pendulum test value (PTV) dos betões com agregado reciclado	126
Figura 4. 48 Textura medida a laser do betão com agregados naturais.....	127
Figura 4. 49 Textura medida a laser do betão com 10% de agregados reciclados	127
Figura 4. 50 Textura medida a laser do betão com 20% de agregados reciclados	128
Figura 4. 51 Textura medida a laser do betão com 30% de agregados reciclados	128
Figura 4. 52 Módulo dinâmico dos betões com agregados reciclados.....	129
Figura 4. 53 Ângulo de fase dos betões com agregados reciclados	130
Figura 4. 54 Fundações com módulo de 60 MPa	131
Figura 4. 55 Fundações com módulo de 80 MPa	131

Figura 4. 56 Fundações com módulo de 100 MPa	132
Figura 4. 57 Resultado dos ensaios de B-RCD de 10%	133
Figura 4. 58 Resultados dos ensaios de B-RCD de 20%.....	134
Figura 4. 59 Resultado dos ensaios de B-RCD de 30%	134
Figura 4. 60 Resultado dos ensaios de BN-REF.....	135
Figura 4.1 A) Ensaio de abaixamento, B) Ensaio de vêbê.....	83
Figura 4.2 Equipamento (A) e medição do espalhamento (B)	84
Figura 4. 3 Percentagem de ar em função da massa volúmica do betão fresco.....	86
Figura 4. 4 Ensaio de permeabilidade KLCS	86
Figura 4. 5 Resultado média dos ensaios de permeabilidade de KLCS.....	87
Figura 4. 6 Absorção de água por imersão	87
Figura 4. 7 Imagens utilizadas para avaliação da porosidade com suporte em imagem.....	88
Figura 4. 8 Porosidade através de imagem.....	89
Figura 4. 9 Relação da porosidade através de imagem com a obtido por absorção de água por imersão	90
Figura 4. 10 Relação entre a permeabilidade K_{tr} e a resistência à compressão.....	91
Figura 4. 11 Resultado dos ensaios da média de tração	92
Figura 4. 12 Abrasão por cântabro dos betões.....	93
Figura 4. 13 Variação da massa volúmica fresca com a razão água/cimento dos betões com agregados naturais	95
Figura 4. 14 Ensaio de permeabilidade LCS em cubos (A) e lajetas (B) e (C) resultado	95
Figura 4. 15 Permeabilidade com permeâmetro KLCS em cubos	96
Figura 4. 16 Permeabilidade KLCS medida nas lajetas de betão com agregados naturais	97
Figura 4. 17 Permeabilidade Falling Head dos betões com agregados naturais.....	98
Figura 4. 18 Permeabilidade KFH função da razão A/C	99
Figura 4. 19 Os resultados da permeabilidade KFH	99
Figura 4. 20 Corelação da permeabilidade obtida pelo KLCS e KFH.....	100
Figura 4. 21 Volume de vários dos betões com agregados naturais.....	102
Figura 4. 22 Resistência à compressão dos betões com agregados naturais	103
Figura 4. 23 Relação da resistência à compressão e a porosidade por imersão	104
Figura 4. 24 Comparação da permeabilidade FH com a resistência da compressão dos betões com agregados naturais	105
Figura 4. 25 Resultados do ensaio de abrasão por cântabro da quantidade de cimento 300 kg/m ³	105
Figura 4. 26 Corelação dos resultados de abrasão por cântabro e a resistência à compressão	106
Figura 4. 27 Resultados do ensaio de vêbê com agregado reciclado	108

Figura 4. 28 Resultados dos ensaios da massa volúmica do betão fresco	109
Figura 4. 29 Resultados dos ensaios de Teor de Ar	110
Figura 4. 30 Coeficiente da permeabilidade K_{os} dos betões com agregados reciclados.....	111
Figura 4. 31 Resultados dos ensaios de permeabilidade de lajes	112
Figura 4. 32 Média da permeabilidade KFH	113
Figura 4. 33 Absorção da água por imersão de 28 dias	114
Figura 4. 34 Absorção da água por capilaridade	115
Figura 4. 35 Absorção da água por capilaridade	115
Figura 4. 36 Resultado do ensaio da resistência à compressão com B-RCD dos 28 dias de idade	117
Figura 4. 37 Resistência à tração dos betões com agregados reciclados.....	117
Figura 4. 38 Resultados dos ensaios de flexão de 28 dias	119
Figura 4. 39 Resultado da perda da massa por cântabro.....	120
Figura 4. 40 Resistência ao sulfato magnésio após 25 ciclos	121
Figura 4. 41 Módulo de elasticidade dos betões com agregados reciclados.....	122
Figura 4. 42 Perda da massa no ensaio de gelo/degelo.....	123
Figura 4. 43 Aspeto dos provetes do ensaio de gelo/degelo: No início do ensaio (A); no ciclo 70 (B); no ciclo 82	124
Figura 4. 44 Volume vazios dos betões com agregados reciclados.....	124
Figura 4. 45 Ensaio de mancha de areia	125
Figura 4. 46 Profundidade média da textura dos betões com agregado reciclado	125
Figura 4. 47 Pendulum test value (PTV) dos betões com agregado reciclado	126
Figura 4. 48 Textura medida a laser do betão com agregados naturais.....	127
Figura 4. 49 Textura medida a laser do betão com 10% de agregados reciclados	127
Figura 4. 50 Textura medida a laser do betão com 20% de agregados reciclados	128
Figura 4. 51 Textura medida a laser do betão com 30% de agregados reciclados	128
Figura 4. 52 Módulo dinâmico dos betões com agregados reciclados.....	129
Figura 4. 53 Ângulo de fase dos betões com agregados reciclados	130
Figura 4. 54 Fundações com módulo de 60 MPa	131
Figura 4. 55 Fundações com módulo de 80 MPa	131
Figura 4. 56 Fundações com módulo de 100 MPa	132
Figura 4. 57 Resultado dos ensaios de B-RCD de 10%.....	133
Figura 4. 58 Resultados dos ensaios de B-RCD de 20%.....	134
Figura 4. 59 Resultado dos ensaios de B-RCD de 30%.....	134
Figura 4. 60 Resultado dos ensaios de BN-REF.....	135

ÍNDICE DA TABELAS

Tabela 2.1 Classes de exposição do betão sem risco de corrosão ou ataque [38].....	26
Tabela 2.2 Classes de exposição do betão com corrosão induzida por cloretos não proveniente da água do mar [38]	26
Tabela 2.3 Classes de exposição do betão com corrosão induzida por carbonatação [38]	27
Tabela 2.4 Classes de exposição do betão com corrosão induzida por cloretos da água do mar [38]	27
Tabela 2.5 Classes de exposição do betão por ataque químico por meio dos agentes agressivos do betão [38]	27
Tabela 2.6 Combinação de classes de exposição do betão [38]	28
Tabela 2.7 Classes de resistência à compressão (betão de massa volúmica normal e para betão pesado) [30]	32
Tabela 2.8 Classes de resistência à compressão para betão leve [30]	33
Tabela 2.9 Classes de densidade do betão leve [30].....	34
Tabela 2.10 Densidade dos materiais de construção civil [40]	35
Tabela 2.11 Classe de abaixamento do betão fresco [30].....	36
Tabela 2.12 Recomendação e Observação de abaixamento do betão fresco [30]	36
Tabela 2.13 Classes Vêbê do betão fresco [30].....	36
Tabela 2.14 Classes de compactação do betão fresco [30]	36
Tabela 2.15 Classes de espelhamento do betão fresco [30]	36
Tabela 2.16 Limites para as características do betão[38].....	38
Tabela 2.17 Espaçamento recomendado entre as juntas transversais	45
Tabela 3. 1 Características do Cimento Portland CEM I 42,5 R.....	50
Tabela 3. 2 Resistência do cimento Portland CEM I 42,5 R	50
Tabela 3. 3 Propriedade físicas dos agregados naturais	52
Tabela 3. 4 Características dos materiais para o betão drenante.....	55
Tabela 3. 5 Fuso granulométrico da mistura betuminosa PA 12,5 [16].....	55
Tabela 3. 6 Fuso granulométrico da mistura betuminosa PA 12,5 e granulometria utilizada para o betão drenante	55
Tabela 3. 7 Composições dos betões com agregados naturais.....	56
Tabela 3. 8 Composições dos betões com agregados naturais da segunda fase	57
Tabela 3. 9 Composição granulométrica dos betões com agregados reciclados.....	57
Tabela 3. 10 Composições dos betões com agregados reciclados.....	58
Tabela 3. 11 ASTM C33 - Requisitos de classificação para agregados grossos - Tamanho N8 [57]	59
Tabela 3. 12 ASTM C33 Requisitos de classificação para agregados grossos - Tamanho N89 [58]	59
Tabela 3. 13 Classe de trabalhabilidade do betão fresco função ensaio de vêbê [60].....	62
Tabela 3. 14 Limites de aplicação do revestimento segundo sua macro textura [81]	78

Tabela 3. 15 Valores de coeficiente de atrito pontual PTV (Pendulum test value).....	80
Tabela 3. 16 Classe dos limites de BPN baseado na norma ASTM D3003	80
Tabela 4. 1 Trabalhabilidade dos betões com agregados naturais.....	84
Tabela 4. 2 Resultados do ensaio de espalhamento dos betões com agregados naturais.....	84
Tabela 4. 3 Massa volúmica do betão fresco e teor de ar	85
Tabela 4. 4 Resultado médio dos ensaios de permeabilidade KLCS	86
Tabela 4. 5 Absorção de água por imersão	87
Tabela 4. 6 Porosidade através de imagem	89
Tabela 4. 7 Resultados dos ensaios da resistência à compressão com vibração.....	90
Tabela 4. 8 Resultado dos ensaios de resistência à tração com os provetes cilíndricos	91
Tabela 4. 9 Resultado de abrasão por cântabro	92
Tabela 4. 10 Abaixamento e Vêbê.....	94
Tabela 4. 11 Massa volúmica fresca dos betões com agregados naturais	94
Tabela 4. 12 Permeabilidade com permeâmetro LCS em cubos.....	96
Tabela 4. 13 Permeabilidade KLCS obtida nas lajetas de betão com agregado natural.....	97
Tabela 4. 14 Permeabilidade Falling Head dos betões com agregados naturais	98
Tabela 4. 15 Comparação da permeabilidade obtida pelo KLCS e KFH	100
Tabela 4. 16 Absorção de água por imersão.....	101
Tabela 4. 17 Massa volúmica aparente e volume de vazios dos betões	102
Tabela 4. 18 Resistência à compressão dos betões com agregados naturais.....	103
Tabela 4. 19 Resultado da relação da resistência à compressão e porosidade por imersão	104
Tabela 4. 20 Resultados do ensaio de abrasão por cântabro da quantidade de cimento 300 kg/m ³	106
Tabela 4. 21 Trabalhabilidade do betão drenante com agregado reciclado	108
Tabela 4. 22 Massa volúmica fresca do betão drenante	109
Tabela 4. 23 Teor de ar do betão drenante	110
Tabela 4. 24 Permeabilidade K _{LS} dos betões com agregados reciclados	111
Tabela 4. 25 Resultado dos ensaios de permeabilidade de lajes.....	111
Tabela 4. 26 Permeabilidade vertical KFH.....	112
Tabela 4. 27 Massa volúmica aparente dos betões com agregados reciclados.....	113
Tabela 4. 28 Volume de vazios do betão com agregados reciclados endurecido por imersão de 28 dias.....	114
Tabela 4. 29 Determinação da absorção da água por capilaridade.....	114
Tabela 4. 30 Resultados dos ensaios da resistência à compressão dos betões de B-RCD	116
Tabela 4. 31 Resistência à tração dos betões com agregados reciclados	117
Tabela 4. 32 Resistência à flexão dos betões com agregado reciclado	118
Tabela 4. 33 Perda da massa dos betões com agregado reciclado no ensaio de cântabro	119
Tabela 4. 34 Resistência ao sulfato magnésio aos 15, 20 e 25 ciclos.....	121

Tabela 4. 35 Módulo de elasticidade dos betões com agregados reciclados	122
Tabela 4. 36 Perda da massa (%) no ensaio de gelo/degelo.....	123
Tabela 4. 37 Pendulum test value (PTV) dos betões com agregado reciclado.....	126
Tabela 4. 38 Módulo dinâmico dos betões com agregados reciclados	129
Tabela 4. 39 Ângulo de fase dos betões com agregados reciclados.....	130
Tabela 4. 40 Ensaio de Fadiga dos betões com agregados reciclados.....	135

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO

Este estudo incide sobre o estudo de betões drenantes com Resíduos da Construção e Demolição (RCD) para aplicação em pavimentos de estradas tendo por objetivo otimizar a sua formulação em termos funcionais e estruturais.

Os betões drenantes abrangem diversos benefícios ambientais importantes pela inclusão da redução potencial dos efeitos das ilhas de calor urbano, pela recarga dos lençóis freáticos, redução efetiva do escoamento de águas pluviais, assim como permite a redução do uso da água de irrigação em paisagens urbanas. Além destes benefícios, os betões drenantes permitem que a água da chuva se infiltre e seja depositada no solo em áreas com vegetação, diminuindo o consumo da água de irrigação para esses fins [1].

Quando aplicados em pavimentos de estradas têm por objetivo eliminar rapidamente a água que cai sobre elas permitindo a existência de uma superfície de rolamento cómoda e segura.

A rápida alteração do clima resulta em diversas consequências pelo mundo, principalmente nos grandes centros urbanos. Chuvas intensas são relacionadas com os danos na infraestrutura urbana e associadas a riscos ligados à sua segurança, tornando-se cada vez mais comuns. São necessárias medidas de adaptação e prevenção às alterações climáticas, em que cada localidade irá responder de modo diferente, pelo que neste sentido essas medidas devem ser integradas de forma a diminuir o risco de acidentes [1].

Os pavimentos drenantes podem aumentar a segurança de circulação, impedem água à superfície, por sua vez diminuindo a aquaplanagem e o brilho dos pavimentos [2]. Outro benefício deste tipo de betão é melhorar a utilização da terra, diminuindo a necessidade de bacias hidrográficas [3].

Para o uso deste tipo de materiais é imprescindível ter conhecimento da sua permeabilidade relacionada diretamente com a porosidade, assim como a resistência que é solicitada para a sua aplicação em causa. Desta forma poderá prevenir as enchentes à superfície e manter a sua funcionalidade para a qual foi dimensionado. Este facto só é possível com estudos adicionais sobre as suas propriedades e desempenho, criando assim um grande potencial para o seu uso. A resistência deste tipo de betões drenantes é inversamente proporcional à porosidade [4], isto é, quanto maior a porosidade menor será a

resistência destes betões. Nos betões drenantes, é comum uma grande variação dos valores de resistência e do desempenho estrutural, isto porque dependem diretamente da porosidade [5]. Nos betões correntes, a porosidade é mínima para um melhor desempenho estrutural e funcional. Nos betões com características drenantes há um valor ótimo (não mínimo) de porosidade para um desempenho funcional [6].

No estudo deste tipo de betões foram dados alguns avanços científicos no sentido de estabelecer uma base sólida científica. Montes et al.[1] desenvolveram ensaios adequados para medir a porosidade. Zouaghi et al. [7] e Olek et al. [8] analisaram a definição das características mecânicas. Olek et al. [8] e Neithalath et al. [9] por último estudaram as propriedades acústicas do material.

Um indicador típico de permeabilidade do pavimento é a sua porosidade. No entanto, Neithalath et al. [9] demonstrou haver mais fatores envolvidos na previsão da permeabilidade do que apenas a porosidade. A porosidade deste tipo de betões depende da granulometria dos agregados, e da compactação realizada na conceção do betão [10].

Na literatura, os valores da porosidade situam-se entre 15 e 25%, existindo uma recomendação pela National Ready Mix Concrete Association (NRMCA) de um valor mínimo recomendado de porosidade de 15% [11].

A combinação entre porosidade e a resistência mecânica pode conduzir a uma otimização da formulação deste tipo de betões para que se consiga obter propriedades adequadas.

O betão pode ser definido de duas formas, por comportamento especificado ou por composição prescrita. Para definir um betão de comportamento especificado é necessário ter como referência a classificação e os requisitos que constam na norma NP EN 206-1 [12] .

Na composição do betão, a relação água/cimento é importante para avaliar a sua resistência, porque uma maior quantidade de água utilizada para se obter a trabalhabilidade desejada nos betões, resulta em perda de resistência, devido ao aumento da porosidade [5].

O betão seco contém pouca umidade, e a água desempenha a função prioritária participando das reações de hidratação do cimento. A relação água/cimento deve ser controlada com rigor, para garantir uma desmoldagem rápida do provete e não diminuir a sua resistência. No betão plástico a pasta ocupa

os espaços vazios deixados pelos agregados, diferentemente do betão seco que tem uma grande presença de ar pela baixa quantidade de água [6].

Os betões secos são caracterizados pelo alto consumo de cimento, em torno de 350 kg/m³ e baixa quantidade de finos em relação a betões plásticos. O teor de cimento está relacionado com a compactação. Aqueles que são mais compactáveis necessitam de uma quantidade superior de cimento [7].

A trabalhabilidade do betão seco, propriedade que determina o esforço mínimo para manusear certa quantidade do betão, depende da umidade, do formato e da textura dos agregados, além do acondicionamento das partículas. Já a coesão está relacionada com a resistência dos agregados à segregação [8].

O betão permeável, segundo Hendricks [13], reduz o ruído na estrada, facto que ocorre devido à estrutura dos poros que permite que o ar entre o pneu e o pavimento escape para dentro do betão, provocando um ruído na estrada com menor frequência, ou seja, menos perceptível.

A importância deste tipo de betões drenantes é notável. Cada vez são mais presentes em diversas construções. Desta forma foram incluídos no manual de tecnologias sugeridas pela Agência de Proteção Ambiental da gestão do escoamento de águas pluviais [14].

A principal função de um pavimento rodoviário é constituir uma superfície livre e desempenada, destinada à circulação de veículos em condições adequadas de segurança, conforto e economia. Para cumprir essa função, a superfície dos pavimentos deve possuir determinadas características, designadas por características funcionais de entre as quais se destacam a aderência, a regularidade geométrica e a capacidade de drenagem das águas superficiais [15].

Nas últimas décadas tem-se registado um aumento significativo do tráfego nas estradas de todo o mundo. Conduzir envolve agora maiores riscos para o utente da estrada. Para diminuir alguns desses riscos, as condições da estrada em geral e a resistência à derrapagem em particular são da máxima importância. O utente deve respeitar as regras de trânsito enquanto os engenheiros responsáveis pelas estradas têm o dever de projetá-las seguras intervindo, em particular, no traçado, na sinalização rodoviária e na escolha do tipo de pavimento.

As características funcionais dos pavimentos são cada vez mais valorizadas, decorrentes da procura de melhores níveis de segurança. Porém, os métodos mais comuns de dimensionamento de pavimentos rodoviários têm apenas em consideração a capacidade estrutural dos mesmos, sendo, por isso, necessário adquirir maior conhecimento na área das propriedades funcionais [16].

Os procedimentos básicos relativos à conceção dos materiais das camadas dos pavimentos podem ser aplicados ao betão drenante de estradas usados para a maioria das camadas superficiais ou camadas de desgaste.

É importante para a conceção dos materiais para as camadas do pavimento atender aos requisitos de viabilidade, resistência e durabilidade.

Nas rubricas que abrangem requisitos relativos aos diferentes materiais são especificadas as propriedades requeridas, os valores limite associados, os respetivos métodos de ensaio descritos nas diferentes normas e documentos aplicáveis [16].

A noção de que os recursos que a humanidade tem usado são limitados tem levado à implementação de práticas mais adequadas no uso de novos materiais.

Os pavimentos rodoviários são infraestruturas cuja construção, utilização e reabilitação provoca impactos ambientais consideráveis, tornando-se indispensável a procura de novas técnicas e processos mais adequados, com vista à mitigação das suas consequências. Além disso, importa perceber que os efeitos dos pavimentos rodoviários não se limitam ao período em que são construídos, mas prolongam-se durante toda a sua vida. No entanto, as metodologias de análise do ciclo de vida propostas até agora concentram-se demasiado nas fases de extração, produção, transporte e aplicação dos materiais, o que é insuficiente para estudar todo o período de vida do pavimento [17].

O betão drenante é um dos materiais importantes e emergentes nas tecnologias de construção para infraestruturas sustentáveis. As aplicações deste betão drenante são diversas, incluem zonas residenciais, estradas, passeios, ciclovias, estacionamento, viadutos, parques de lazer, aeroportos e portos.

O betão drenante é considerado um material de construção sustentável, produzido a partir de materiais prontamente disponíveis e de fácil execução [1]. Com este tipo de material drenante, segundo diversos

autores, obtém-se um potencial enorme como um material sustentável, contribuindo assim para uma construção verde e infraestruturas sustentáveis [1].

Os betões drenantes são considerados um material com benefícios sustentáveis na área da construção, nomeadamente em termos de gestão de águas pluviais, remoção da poluição da água e a manutenção dos níveis de água no solo, permeabilidade dos fluidos de automóveis, como o óleo e anticongelante evitando que sejam depositados nos lençóis freáticos ou nos lagos próximos durante uma chuvada.

A permeabilidade em pavimentos rígidos drenantes assume um papel relevante no seu desempenho, influenciando em aspetos como a segurança, conforto na circulação e respetiva durabilidade.

A um pavimento devem exigir-se duas qualidades: funcional e estrutural. A primeira está relacionada com aquilo que efetivamente o utilizador sente, nomeadamente conforto e segurança de circulação. A segunda avalia a capacidade estrutural do pavimento para suportar as cargas dos veículos e as variações térmicas [18].

Um dos principais métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos, sendo provavelmente o mais conhecido e utilizado em todo o mundo, é o método da PCA - Portland Cement Association. Os critérios de dimensionamento considerados são a fadiga e a erosão. A fadiga consiste na rotura do pavimento devido a um fendilhamento excessivo provocado pela repetição das cargas e a erosão contempla a ocorrência de outras deficiências do pavimento devido a perda ou deslocação de material erodido na camada de apoio das lajes. A erosão resulta da ação da água e do tráfego, conjugada com a perda de impermeabilização das juntas, e leva à perda de finos através das juntas (bombagem), acumulação de finos sob uma das lajes contíguas a uma junta provocando o seu desnivelamento (escalonamento) e, eventualmente, falta de apoio no bordo longitudinal das lajes junto às bermas.

Apesar do investimento inicial ser maior nos pavimentos rígidos, o seu período de vida útil considerado é, no mínimo, de 30 anos, podendo chegar aos 40 anos com manutenção, potenciando esse investimento.

Tal como os pavimentos flexíveis, os pavimentos rígidos podem também ser dimensionados através de métodos mais expeditos, nomeadamente utilizando o manual do MACOPAV [19].

A relação entre a distribuição da porosidade e a permeabilidade com a resistência à compressão permitiu uma análise eficaz, justificando requisitos técnicos, nomeadamente as condições de segurança, conforto e economia, de forma a escolher neste estudo a melhor formulação de betão drenante.

A investigação dos diversos fatores possibilitou a escolha de um betão drenante otimizado para aplicação em pavimentação rodoviária, de forma a colmatar zonas com difícil escoamento e prevenindo de alguma forma os resultados das alterações climáticas.

No que diz respeito aos resíduos da construção e demolição encontrados tanto no processo de fabricação, como na execução de obras na indústria da construção civil, as leis encontradas que regulamentam sobre a disposição final desejada acabam sendo de certa forma muito exigentes sobre o padrão de qualidade satisfatório [20].

1.2.JUSTIFICAÇÃO DO TEMA E A SUA IMPORTÂNCIA

A preocupação geral quanto às condições geométricas, funcionais e estruturais dos pavimentos rodoviários, relacionadas com o fator de segurança de circulação, desperta cada vez mais o interesse em estudar os fatores que influenciam o desempenho dos pavimentos.

Atualmente não são conhecidos grandes estudos sobre o comportamento da permeabilidade das camadas drenantes, nem sobre eventuais influências das características geométricas, geologia da área envolvente e tráfego, em estradas com esta camada de desgaste [21].

Este estudo incide sobre o desempenho de diversos betões drenantes com o objetivo de otimizar uma formulação ideal para drenar a água segundo os requisitos técnicos normativos.

Em relação ao conforto e segurança de circulação, desperta cada vez mais o interesse em estudar os fatores que levam à diminuição da vida útil dos pavimentos. Por estas razões, o trabalho desta tese de doutoramento consiste na “Conceção de um Betão Drenante para Pavimentos Rígidos”.

Os materiais dos pavimentos rígidos com betões drenantes, após a sua construção, sofrem um processo de degradação sob a ação do tráfego e das condições climáticas. Esse processo que ocorre durante a vida útil do pavimento, poderá ser mais lento se o pavimento for bem construído e bem conservado. Deste modo, é fundamental que a caracterização mecânica dos betões seja adequada à sua aplicação. Assim, devem ser efetuados ensaios de espalhamento, abaixamento, vêbê, determinação da porosidade e massa volúmica, no que diz respeito à norma NP EN 12350 nos ensaios de betão fresco. No caso do betão endurecido, são os ensaios de resistência à compressão e ensaios de resistência a tração cilíndrica, resistência ao desgaste por cântabro, ensaio de permeabilidade com permeâmetro LCS, avaliação do coeficiente “K” por permeabilidade Feeling Head e ensaios de porosidade por imersão e

avaliação da porosidade recorrendo a imagem 2D para quantificação do volume de vazios. Quanto à durabilidade foram efetuados os ensaios de sulfatos e gelo-degelo. Assim, também sobre o betão drenante foram efetuados os ensaios de fadiga, ensaios de módulo dinâmico, avaliação da textura por laser e ensaio do pêndulo britânico.

A importância da construção de pavimentos drenantes tem como objetivo prevenir os riscos relacionados com atritos e hidroplanagem e reduzir outros impactos como sonoros, visibilidade e ambiental.

A forma rápida de prevenir determinados riscos à superfície dos pavimentos, associados a inundações e enchentes rápidas, consiste em retirar rapidamente da superfície dos pavimentos o excesso de água da chuva. Isto é conseguido pela inclinação transversal da estrada, mas de uma forma mais eficaz pela utilização de superfícies drenantes.

Os pavimentos drenantes são constituídos por uma camada de desgaste com uma estrutura aberta e porosa sobrejacente a uma camada de regularização impermeável. O objetivo deste pavimento é proporcionar uma rápida drenagem das águas superficiais de modo a diminuir o risco de ocorrência do fenómeno de hidroplanagem e da perda de visibilidade associada à projeção de água precipitada [24].

A camada de desgaste porosa permite que a água não se acumule à superfície e que seja escoada ao nível desta camada. No entanto, as camadas betuminosas subjacentes devem possuir características de impermeabilidade adequadas para que não se verifiquem problemas de infiltração e saturação ao nível das camadas de base, sub-base e do solo de fundação.

Um dos principais objetivos na utilização das camadas drenantes é tentar eliminar o risco da hidroplanagem. Este fenómeno ocorre nos pavimentos impermeáveis (tradicionais) quando a água existente sobre o pavimento não se consegue libertar da superfície de contacto “pneu-pavimento” através do relevo dos pneus.

Os pavimentos drenantes diminuem a possibilidade da existência desta película de água, a qual é absorvida devido à porosidade e permeabilidade elevada destas camadas. Esta água absorvida para dentro do pavimento através dos seus poros é conduzida até à berma.

1.3.MOTIVAÇÃO

Depois da Independência de Timor-Leste em 2002 até à data, tem-se verificado um aumento gradual do uso de pavimentos rígidos na rede viária principal. A sua aplicação não se limita apenas a infraestruturas existentes.

Assume-se que os materiais utilizados são materiais locais e agregados grossos e finos, areia natural e outros materiais disponíveis localmente em Timor-Leste, a não ser o cimento que vem de Indonésia. A qualidade, a durabilidade e o baixo custo da pedra e betão são as principais razões para ser o material de construção mais usado em Timor-Leste.

O Plano Rodoviário Nacional (PRN), instituído pelo plano do V e VI Governo de Timor Leste, ocupou a posição de 3º lugar do índice do plano geral do Ministro do Desenvolvimento para Obras Públicas e no jornal da Republica [22]. O Decreto do Presidente da República N.º 64/2017 de 2 de outubro veio definir a rede rodoviária nacional, constituída pelas redes fundamental e complementar. No entanto, sabe-se que o desenvolvimento social e económico de um país depende, entre outros fatores, da mobilidade das pessoas e bens. A rede rodoviária em Timor Leste, desde 2002, tem aumentado a sua extensão, sofrendo alterações ao longo dos anos, que se traduzem numa melhoria constante das condições do ordenamento do território e ocupação do solo, tendo sempre subjacente o interesse público e a minimização dos impactos ambientais de modo a otimizar a gestão da rede rodoviária nacional [22].

A permeabilidade, particularmente nos pavimentos rígidos drenantes assume um papel relevante no seu desempenho, influenciando aspetos como segurança e conforto na circulação dos veículos e a durabilidade. Os betões drenantes são igualmente empregues para aumentar o escoamento das águas pluviais e recarregar o lençol freático subterrâneo.

No caso de Timor-Leste, os transportes rodoviários constituem o principal meio de transporte utilizado e a rede rodoviária assume um papel fundamental na sociedade. Atualmente, para além do desenvolvimento de novas infraestruturas rodoviárias, verifica-se também a necessidade em reabilitar e redefinir algumas das infraestruturas existentes, uma vez que algumas delas aproximam-se do seu período de vida útil.

Para contribuir para a sustentabilidade das infraestruturas é importante reduzir o consumo de materiais novos, também nas estradas, e tentar recorrer a produtos que deixaram de ter aplicação corrente como são os resíduos de construção e demolição.

1.4.OBJECTIVOS

Este estudo incide sobre a conceção de betões drenantes, com resíduos de construção e demolição, para aplicação em pavimentos rodoviários com o objetivo de otimizá-los em termos de drenagem superficial.

O estudo terá como base o caso das misturas betuminosas drenantes aplicadas em camadas de desgaste para pavimentos rodoviários. A principal característica estudada foi a permeabilidade do betão poroso a qual está relacionada diretamente com o fuso granulométrico dos agregados.

Para realizar este trabalho foi necessário avaliar inicialmente os requisitos para os materiais, habitualmente utilizados na construção dos pavimentos drenantes. Grande parte dessa informação serviu de base para a definição do tipo de materiais a utilizar.

O estudo dos agregados para o betão tem uma importância relevante, tanto ao nível da dimensão do agregado como da curva granulométrica bem como à sua forma geométrica, quando se pretende conceber um betão com características porosas.

Assim, este estudo tem por objetivo conceber um betão drenante com resíduos de construção e demolição com características porosas para utilizar na camada superficial de pavimentos rodoviários para promover a drenagem superficial.

1.5.METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho produziu-se três betões com três tipos de agregados diferentes, uma areia fina (0/4), e dois agregados de dimensões 4/10 e 10/14. O estudo consistiu numa variação da razão água-cimento para os três betões, fixando o fuso granulométrico dos agregados. Foram também produzidos três betões drenantes com 10%, 20% e 30% de Resíduos da Construção e Demolição (RCD) para aplicação em pavimentos de estradas.

De forma a atingir os objetivos deste estudo, realizou-se uma série de ensaios relacionados com a permeabilidade e compressão do betão. Caracterizou-se todos os betões com diferentes composições

granulométricas dos agregados, relacionando os dados da porosidade com a capacidade de drenagem. Tanto a porosidade e a capacidade de drenagem foram caracterizadas em laboratório com provetes adequados aos tempos de vibração 20, 40 e 60 segundos, para cada razão de água/cimento (A/C) de 0,30, 0,35 e 0,40.

Foram realizados ensaios aos betões frescos e aos betões endurecidos. Aos betões frescos foram realizados ensaios de abaixamento, ensaios de vêbê, ensaios de espalhamento, ensaios de massa volúmica e ensaios do teor de ar. Aos ensaios endurecidos foram realizados ensaios de resistência à compressão, à tração ou compressão indireta cilíndricas, determinação de absorção de água por imersão e capilaridade, ensaios de permeabilidade com permeâmetro do coeficiente k_{LCS} (Laboratório de caminos de Santander) e k_{FH} (falling head), e a determinação da resistência ao desgaste por máquinas de Los Angeles (Cântabro) e análise da porosidade de imagem 2D.

Os ensaios que foram realizados com incorporação dos agregados reciclados foram os ensaios de betão frescos e de betão endurecido.

A reutilização dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição realizou-se com três percentagem de 10%, 20% e 30% com uma vibração de 40 segundos para todos os provetes.

1.6. ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese encontra-se dividida em seis capítulos, estando estruturada da forma apresentada nos seguintes parágrafos.

No primeiro capítulo, denominado de Introdução, apresenta-se uma breve descrição do tema a investigar bem como uma contextualização desta investigação no panorama técnico-científico, a justificação do título, as motivações, os objetivos, a metodologia e a organização da tese.

No segundo capítulo, denominado de Revisão do Estado de Arte, são apresentados os pavimentos rodoviários, de uma forma geral, abordando-se o tipo de pavimentos rodoviários flexíveis e rígidos existentes, os materiais utilizados, as características e os métodos de formulação dos betões drenantes, bem como os métodos de construção e reabilitação utilizados. A inclusão deste capítulo mais geral na tese considerou-se pertinente de forma a facilitar a compreensão dos vários aspetos considerados na metodologia de avaliação.

A composição e especificação do betão integra também os resultados da revisão bibliográfica efetuada, mas agora claramente direcionado ao tema de betão drenante em estudo. Neste capítulo, apresenta-se a classificação e as propriedades dos betões que influenciam a sua qualidade. A durabilidade dos betões é também abordada.

No terceiro capítulo, denominado de Materiais e Métodos de Ensaio, são apresentados os materiais utilizados, o estudo dos betões e os ensaios realizados aos betões frescos e endurecidos.

No quarto capítulo, denominado de “Análise dos resultados”, são apresentados e analisados os resultados de todos os ensaios conduzidos aos betões frescos e endurecidos.

No quinto capítulo denominado Conclusão, apresentam-se as principais conclusões alcançadas com este trabalho de acordo com as normas para os ensaios de materiais relacionados com a qualidade, durabilidade e ensaios dinâmico das vias e comunicações da construção rodoviária.

Finalmente, a tese termina com as Referências Bibliográficas onde são listadas todas as referências indicadas ao longo do texto.

2. REVISÃO DO ESTADO DE ARTE

Ao longo da sua vida, os pavimentos rodoviários são sujeitos a ações que contribuem para uma redução contínua da sua qualidade, traduzindo-se no aparecimento de uma diversidade de degradações estando estas presentes na superfície e/ou na estrutura do pavimento.

A importância da observação dos pavimentos e da identificação das secções que necessitam de intervenção deve-se a requisitos de conforto e segurança, tanto na rede rodoviária nacional como na rede rodoviária urbana. Neste sentido, é essencial definir as prioridades de intervenção, de forma a manter a qualidade global dos pavimentos a um nível aceitável aos requisitos de conforto e segurança existentes, considerando também os aspetos relacionados com as restrições financeiras [23].

Segundo o Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (JAE, 1995) [24], os dimensionamentos corretos dos pavimentos, em relação aos materiais e aos processos construtivos, visam satisfazer os seguintes requisitos:

- oferecer aos utentes um nível de serviço adequado para que a circulação se faça em condições de segurança, conforto e economia;
- corresponder às exigências das diferentes classes de tráfego e taxas de crescimento expectáveis;
- garantir condições adequadas de fundação para os pavimentos, permitindo, desta forma, que a sua construção se faça nas melhores condições, e que, após entrada do pavimento em serviço, se reduza a ocorrência de deficiências e a necessidade de efetuar trabalhos de conservação dispendiosos;
- melhorar a qualidade dos pavimentos a construir, atuando, designadamente, nas condições de execução das obras e na especificação de materiais e processos construtivos, que tenham em conta os equipamentos atualmente disponíveis;
- sistematizar, tanto quando possível, as estruturas de pavimentos dos vários tipos que têm vindo a ser adotadas na rede nacional;
- permitir que a administração rodoviária disponha de elementos que facilitem o planeamento, a construção, a avaliação do comportamento, a conservação e a beneficiação dessas infraestruturas [24].

Deste modo, a observação do estado superficial do pavimento é, de entre os parâmetros considerados numa observação global do pavimento, o de mais difícil caracterização. Esta dificuldade advém da

subjetividade associada ao julgamento humano na recolha deste tipo de informação, o que pode comprometer a fiabilidade dos resultados obtidos; mas também resulta da rapidez de observação, que pode ser bastante variável em função do processo adotado.

2.1.OS PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

As vias de comunicação e, em particular, a rede rodoviária, constituem a infraestrutura fundamental para o desenvolvimento global de qualquer país. Durante muitas décadas a rede rodoviária portuguesa constituiu um fator de estrangulamento do desenvolvimento do país. A partir de 1985, com a aprovação do 2º Plano Rodoviário iniciou-se um grande esforço nacional com o objetivo da modernização da rede rodoviária nacional [17].

Tendo em conta a experiência com a implementação do 2º Plano Rodoviário em 1998 foi aprovado o Plano Rodoviário Nacional (PRN 2000) [17], o qual introduz alguns ajustamentos na estrutura do anterior plano.

A Evolução da Rede Rodoviária em Portugal representa a principal infraestrutura de transporte de pessoas e mercadorias sendo, por essa razão, um elemento essencial para o desenvolvimento socioeconómico do país. Comparativamente a outros países europeus, a rede rodoviária nacional tinha uma elevada extensão, com uma reduzida percentagem a ser utilizada por um grande volume de tráfego de elevada agressividade para os pavimentos.

Entretanto, continuando o esforço financeiro exigível para implementar este plano rodoviário, terá que ser dada uma atenção especial à manutenção e reparação do pavimento drenante.

2.2.CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PAVIMENTOS

Os pavimentos rodoviários têm como principal função assegurar uma superfície de rolamento livre e desempenada que permita a circulação de veículos em condições de segurança, conforto e economia, durante o período de vida do pavimento, devendo ser capazes de resistir às ações do tráfego e a uma variedade de condições climáticas a que estarão sujeitos.

O seu estado pode ser descrito por indicadores que se agrupam em dois tipos de requisitos exigidos aos pavimentos: a qualidade funcional e a qualidade estrutural [24]. A qualidade funcional está relacionada com as exigências dos utentes, no que se refere ao conforto e segurança de circulação. Estas exigências estão diretamente relacionadas com as características superficiais do pavimento, nomeadamente, a

regularidade, a textura, a cor e o ruído provocado pela circulação dos veículos. Conclui-se, portanto, que estas características estão intimamente relacionadas com a camada de desgaste do pavimento [25].

A qualidade estrutural diz respeito à capacidade de o pavimento suportar as cargas dos veículos sem sofrer alterações para além de determinados valores limites. Esta está dependente de características como a integridade, traduzidas pela ausência de fendas, covas, depressões e outras deformações permanentes diferenciais e está relacionada com o comportamento estrutural de todo o pavimento.

Relativamente à sua constituição, um pavimento rodoviário consiste num sistema multiestratificado, composto por um conjunto de camadas com espessura finita, apoiadas na fundação constituída pelo terreno natural, o qual pode ser melhorado superficialmente, formando o leito do pavimento.

Nas camadas que compõem um pavimento podem distinguir-se, pela função que desempenham, a camada superficial ou “camada de desgaste” e o corpo do pavimento. A camada de desgaste tem a função de assegurar as características funcionais, de modo a contribuir para uma circulação com conforto e com segurança, e de impermeabilizar o pavimento, evitando a entrada de água exterior para as camadas inferiores e para o solo de fundação. O corpo do pavimento, o principal responsável pela capacidade do pavimento em suportar as cargas do tráfego, compreende as camadas estabilizadas com ligantes (betuminosos ou hidráulicos) e as camadas granulares, as quais se dispõem, normalmente, com qualidade e resistência decrescentes, de cima para baixo, em consonância com a progressiva redução dos esforços em profundidade [26].

2.3. TIPOS DE PAVIMENTOS

Dependendo do tipo de materiais utilizados nas camadas superiores, resultam diferentes tipos de pavimentos, os quais se comportam de maneiras diferentes quando sujeitos às cargas dos veículos combinadas com as condições climáticas. Assim, e em função do tipo de materiais e da sua deformabilidade, podem distinguir-se três tipos de pavimentos: flexíveis, rígidos e semirrígidos.

2.3.1. Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis são constituídos por camadas betuminosas (camadas superiores) e granulares (camadas inferiores), as quais se deformam por ação das cargas aplicadas. A sua constituição pode ser muito diversa, em função da intensidade de tráfego, da capacidade de carga da fundação e das características dos materiais disponíveis, as quais, por sua vez, dependem das condições climáticas.

Assim, quando o tráfego é pouco agressivo, e se dispõe de materiais granulares de boa qualidade a custo favorável, podem ser projetados e construídos pavimentos onde é preponderante a componente granular. Em contrapartida, perante um tráfego intenso, numa região com reduzidos recursos quanto a materiais granulares de qualidade, e face a uma fundação de reduzida capacidade de suporte, será necessário considerar um pavimento integrando várias camadas betuminosas, com espessura total significativa [27].

Os esforços instalados ao nível das diferentes camadas determinam, em geral, uma evolução típica dos pavimentos flexíveis, em direção a dois estados últimos de ruína, o fendilhamento das camadas betuminosas e a deformação permanente das camadas em geral, controlada ao nível da fundação, sendo estes estados considerados pelos principais métodos de dimensionamento [23].

2.3.2. Pavimentos rígidos

Os pavimentos rígidos são constituídos por uma laje em betão de cimento, podendo assentar diretamente sobre a fundação (no caso de vias sujeitas a um tráfego reduzido) ou conter outras camadas entre a fundação e a laje de betão, nomeadamente, camadas de betão pobre (betão de cimento menos resistente), de material granular tratado com cimento, normalmente designado de agregado de granulometria extensa tratado com cimento – AGEC, ou de solo-cimento.

A elevada resistência deste tipo de pavimentos, devida à resistência à flexão do betão de cimento, faz com que eles não sofram deformações acentuadas, mesmo quando submetidos a condições severas de tráfego pesado, intenso e lento, e a elevadas temperaturas. Pela mesma razão, as tensões verticais provocadas pelas cargas distribuem-se sobre uma grande área da laje de betão e, deste modo, a pressão vertical que atinge a fundação corresponde a uma pequena fração da pressão de contacto dos pneus [28].

2.3.3. Pavimentos semirrígidos

Os pavimentos semirrígidos compreendem uma combinação de camadas betuminosas e em betão. Normalmente apresentam uma espessura total entre 20 e 50 cm, sendo as camadas de betão utilizadas como camadas de base, enquanto as betuminosas são utilizadas como camadas superiores, geralmente apenas de desgaste com base NP EN 14227-10: 2013 [29]. Este tipo de pavimento pode apresentar alguns problemas devido à propensão das camadas em cimento para fendilhar, fenómeno que tenderá a refletir-se nas camadas superiores. De forma a evitar-se ou retardar-se essa propagação poderá interpor-

se uma camada retardadora da propagação de fendas SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer) entre as camadas de betão e as betuminosas [27].

Pode ainda considerar-se a existência de um quarto tipo de pavimento denominado como semiflexível, constituído por uma camada de desgaste com um material designado por “Grouted Macadam”. Na sua essência, este material composto compreende um esqueleto de mistura betuminosa porosa sobre o qual é despejada uma calda de cimento preenchendo completamente os espaços vazios. Este tipo de pavimento tem o potencial de combinar as melhores qualidades de pavimentos flexíveis e rígidos, isto é, a ausência de juntas, característica dos pavimentos betuminosos, e uma vida longa e com elevada capacidade de carga, característica dos pavimentos de betão, fornecendo ainda, pela sua superfície impermeável, uma boa proteção à fundação contra a entrada de água [28].

2.4. BETÕES COM LIGANTES HIDRÁULICOS

Também relativamente às misturas com ligantes hidráulicos existem vários tipos, variando as suas características consoante se destinam a ser aplicadas em camadas de sub-base, de base ou de desgaste. O MACOPAV [24] divide estas betões em três grupos: 1. Os betões de cimento, aplicados em camadas de desgaste de pavimentos rígidos, considerando betões com resistências características à tração por flexão, aos 28 dias de idade, de 4,0 a 4,5 MPa e uma quantidade de cimento entre 300 e 350 kg/m³; 2. As misturas de agregados com ligantes hidráulicos, com menor dosagem de ligante, que podem ser aplicadas em camadas de base ou sub-base, sob camadas betuminosas (pavimentos semirrígidos) ou sob as lajes de betão de cimento (pavimentos rígidos). No caso dos pavimentos rígidos, para além de se melhorarem as condições de apoio das lajes de betão de cimento, pretende-se limitar o fenómeno de erosão das camadas de base, o qual pode ser bastante reduzido adotando uma dosagem mínima de ligante de 140 kg/m³ de mistura. No caso dos pavimentos semirrígidos é necessário conferir às misturas aplicadas em camada de base uma resistência mínima à tração em compressão diametral de 1,0 MPa, aos 28 dias, tendo em vista dotar a estrutura do pavimento de uma adequada resistência à fadiga; 3. As misturas de solo-cimento fabricadas em central, utilizadas em camada de sub-base, desde que se disponha de solos granulares com adequadas características granulométricas e de homogeneidade.

De seguida, são apresentadas com mais algum pormenor as características dos principais tipos de misturas produzidas com ligantes hidráulicos, que são aplicadas em camadas de pavimentos.

2.4.1. Betão de cimento

O betão consiste na mistura de agregados britados, areia, cimento e água, podendo conter ainda algum aditivo que melhore as suas características de resistência e de trabalhabilidade.

O betão de cimento para aplicação em camadas de desgaste deve possuir, entre outras, muito boas características mecânicas. Para tal, a quantidade de cimento utilizada por metro cúbico de betão não deve ser inferior a 300 kg (podendo chegar aos 350 kg, conforme referido anteriormente) e a razão água/cimento não pode exceder o valor de 0,5. Para estradas da rede fundamental (integrando os Itinerários Principais IP) o betão deve apresentar uma resistência característica à tração por flexão de 4,5 MPa, aos 28 dias de idade.

A Norma Portuguesa NP EN 206:2013 +A1, [30] e estabelece os requisitos a que o betão deve obedecer no que respeita à consistência, massa volúmica, resistência, durabilidade e proteção contra a corrosão do aço embebido, tendo em conta o processo de fabrico e execução.

2.4.2. Betão pobre

O betão pobre consiste num tipo de betão semelhante ao descrito acima, sendo a principal diferença a quantidade de cimento que entra na sua composição que, no caso do betão pobre, é menor. Os betões pobres em cimento utilizam-se por exemplo, nos pavimentos rígidos na execução da camada de sub-base, e nos pavimentos semirrígidos aplicam-se na realização da camada de base que é o elemento de maior capacidade estrutural daquelas estruturas.

2.4.3. Agregado de granulometria extensa estabilizado com cimento

Este material resulta da mistura de agregados de granulometria extensa (agregados grossos e finos) com cimento, podendo ser aplicado em camadas de sub-base, base e regularização. O fuso granulométrico e características dos agregados encontram-se definidos no Caderno de Encargos da Estradas de Portugal [31], o qual define também que, quando aplicado em camadas de base e regularização, o teor em ligante a incorporar na mistura será no mínimo de 110 kg/m³.

A aplicação deste material preconiza o emprego ulterior de uma rega com emulsão betuminosa para proteção contra a evaporação da água necessária à cura do material, e de uma camada de gravilha para proteção contra as ações mecânicas no caso de a camada estar sujeita ao tráfego de obra.

2.4.4. Solos estabilizados com cal ou cimento

Nas zonas em que os solos não têm características satisfatórias, ou quando se pretenda fazer, com os solos, uma camada mais resistente, recorre-se geralmente à sua estabilização, misturando-os com outros materiais [32]. Para além da possibilidade de estabilização mecânica, misturando-os com outros solos, pode também recorrer-se à sua mistura com ligantes hidráulicos, isto é, com cal ou cimento.

Os solos a utilizar deverão estar isentos de matéria orgânica, de materiais expansivos e de quaisquer outros produtos prejudiciais que possam afetar a ligação com o ligante e influenciar os tempos de presa e o desenvolvimento da resistência da mistura [31]. Adicionalmente, os solos deverão obedecer aos requisitos definidos nas Normas NP EN 14227-10 [32] e NP EN 14227-11 [33].

Branco et al [34] apontam duas técnicas para a utilização deste tipo de estabilização. Uma, designada de “solo tratado com cimento”, consiste na adição de pequenas quantidades de cimento (3 a 4% de teor em cimento) em estradas com pouco tráfego, visando essencialmente diminuir a suscetibilidade à água do solo e aumentar ligeiramente a sua resistência. A outra técnica, designada de “solo-cimento”, consiste na adição de dosagens de cimento maiores, conduzindo a um material de resistência mais elevada que pode ser usado como camada de sub-base ou mesmo de base em pavimentos de estradas com tráfego significativo. No solo tratado com cimento a estabilização é feita no local. No solo-cimento isso também é possível, embora, para utilizações mais importantes, a mistura seja feita em betoneira ou em central para garantir uma melhor qualidade e homogeneidade.

2.5. CONSTITUIÇÃO E MODO DE COMPORTAMENTO DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

Os pavimentos rígidos têm uma constituição e modo de funcionamento bem diferenciados relativamente aos pavimentos flexíveis, o que importa descrever resumidamente.

Um pavimento rígido (Figura 2.1) é constituído por uma laje de betão de cimento, designada a seguir por laje de betão, a qual é apoiada numa camada de base constituída por betão pobre. Neste pavimento considera-se que a laje de betão desempenha o papel de camada de desgaste.

A elevada resistência deste tipo de pavimento está relacionada com a resistência do betão de cimento fazendo com que se trate de um tipo de pavimento muito resistente a elevadas pressões de contacto dos veículos pesados. Por isso estes pavimentos não sofrem deformações viscoelásticas, mesmo quando submetidos a condições severas de tráfego pesado, intenso e lento e elevadas temperaturas.

Por outro lado, as tensões verticais transmitidas pelas cargas distribuem-se sobre uma grande área da laje de betão, de modo que a tensão vertical máxima que atinge a fundação representa uma pequena fração da pressão de contacto.

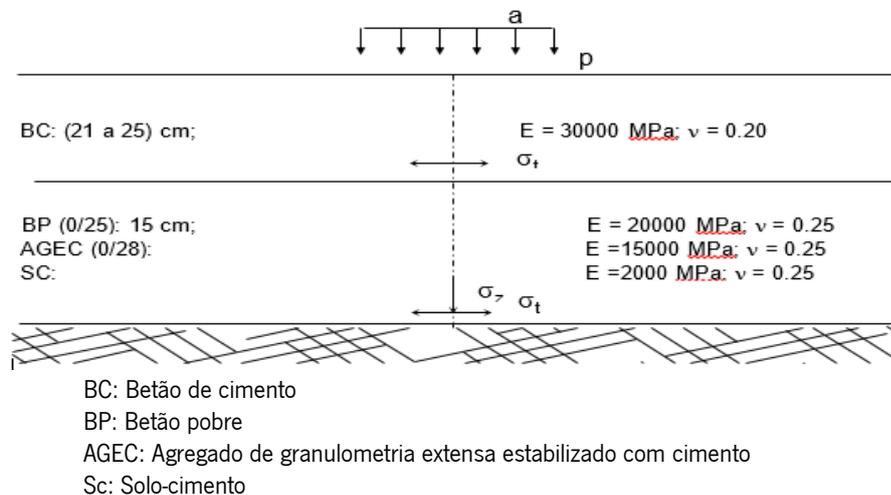


Figura 2.1 Constituição de um pavimento rígido [24]

Em certos casos de solos de reduzida capacidade de carga e com alguma heterogeneidade nas suas características, físicas e mecânicas, e para tráfego intenso, deve adotar-se uma camada de sub-base.

Relativamente ao desempenho deste pavimento, verifica-se que a resistência mecânica do betão aumenta ao longo do tempo, com uma diminuição lenta da sua qualidade estrutural.

A fadiga à flexão do betão é que determinará o fendilhamento generalizado do pavimento e, por consequência a necessidade de um reforço ou mesmo a sua reconstrução. Neste fenómeno de fadiga têm influência vários fatores tais como: a resistência à tração por flexão, a intensidade do tráfego, as condições climáticas, a geometria das lajes e respetivas condições de apoio.

Quanto à conservação, um pavimento rígido ao longo do seu ciclo de vida requer reduzidas intervenções: eventual selagem de juntas e fendas, reconstrução de alguma laje ou reabilitação da macro textura. Estas intervenções são realizadas com recurso a novos materiais e métodos: resinas sintéticas, betões de elevadas plasticidades, fresadoras, tratamento superficiais.

Relativamente às características superficiais dos pavimentos rígidos, a respetiva resistência ao deslizamento obtém-se através da utilização de areia siliciosa e dando ao betão fresco uma textura superficial adequada, através da produção de ranhuras, no sentido longitudinal ou transversal. A macro textura resultante deve ser rugosa para velocidades elevadas e mais lisa para velocidades moderadas.

Outras características superficiais a ter em conta por razões de segurança, comodidade e economia, são as propriedades refletoras do pavimento. A visibilidade noturna melhora significativamente com um pavimento claro, reduzindo-se também os equipamentos e o consumo de energia para iluminação da estrada.

Os tipos de pavimentos rígidos existentes são os seguintes (Figura 2. 2):

- Pavimentos de betão vibrado (lajes em betão não armado; juntas transversais e longitudinais, com ou sem barras de transferência de carga (passadores));
- Pavimentos de betão armado contínuo;
- Pavimentos de betão pré-esforçado;
- Pavimentos formados por elementos pré-fabricados

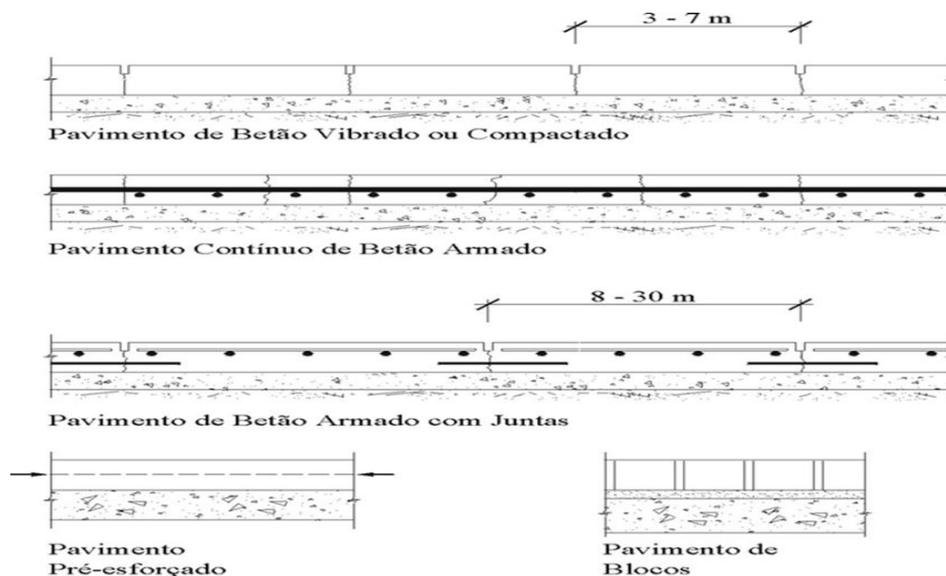


Figura 2. 2 Tipos de pavimentos rígidos [24]

2.5.1. Pavimento de betão vibrado

A maioria dos pavimentos rígidos, formados por betão vibrado, dispõem de juntas longitudinais de ligação e juntas transversais de construção, formando em geral lajes retangulares, com formato próximo do quadrado.

Nas juntas longitudinais são colocadas frequentemente camadas de ligação constituídas por varões de aço nervurado de modo a manter as duas lajes unidas. Estas barras permitem o encurvamento das lajes devido aos gradientes térmicos, mas impedem a abertura da junta e o assentamento diferencial das lajes sob a ação do tráfego [35].

As juntas transversais, em geral com espaçamento de 5 metros, são um obstáculo à manutenção de uma solução de continuidade estrutural do pavimento, nomeadamente tendo em conta que os movimentos verticais das lajes, sob a ação do tráfego, são diferentes no interior das lajes e nas juntas. O método mais usual para melhorar a transmissão de cargas entre lajes contínuas consiste na colocação de passadores, ou seja, barras lisas de aço não aderidas ao betão numa extremidade para permitir os movimentos relativos das lajes.

Estas barras situam-se a meio da espessura, paralelas entre si e ao eixo da via. Estes passadores praticamente impedem o escalonamento do pavimento nas juntas.

2.5.2. Pavimento de betão armado

Este grupo de pavimentos pode subdividir-se ainda nos seguintes subtipos: pavimentos contínuos de betão armado; pavimentos de betão armado; com juntas constituídos por lajes; pavimentos armados com fibras de aço. No entanto, é um primeiro subtipo aquele que é geralmente adotado neste tipo de pavimento. Trata-se de um pavimento em que a existência de uma armadura contínua colocada no centro da laje, permite controlar a abertura de fendas devidas à retração do betão. Estas fendas com abertura inferior a 0,5 mm, distanciadas em geral de 1 a 3 metros, são impercetíveis para o utente, não se deterioram sob a ação do tráfego, não pondo em perigo a capacidade estrutural do pavimento. O elevado custo inicial deste tipo de pavimento é compensado pelo custo nulo da sua conservação [36].

2.5.3. Pavimento de betão pré-esforçado

Os pavimentos de betão pré-esforçado são constituídos por lajes de elevado comprimento, da ordem de 120 metros, permitindo reduzir a espessura em cerca de 50% relativamente a um pavimento rígido não armado.

No entanto, são reduzidas as aplicações deste tipo de pavimento em estradas, em particular devido às dificuldades de instalar pré-esforço em zonas de traçado curvo. Assim trata-se de um tipo de pavimento rígido que tem tido alguma aplicação em pavimentos aeroportuários, devido à geometria favorável das pistas.

2.5.4. Pavimentos formados por elementos prefabricados

Este tipo de pavimento tem a sua camada de desgaste constituída por elementos prefabricados, os quais em geral são blocos retangulares (2,0x1,0 m² com a espessura de 6 a 13 cm) ou placas de betão

armado, quadradas ou retangulares (1,5x3,0 m², espessura de 12 a 16 cm). Os blocos de betão podem possuir algum encaixe entre si.

Os pavimentos constituídos por blocos de betão dispõem de uma base de um betão pobre, sobre a qual se espalha uma camada de areia com uma espessura de 3 a 5 cm, a qual tem também função drenante. As juntas entre blocos são preenchidas com areia por vibração de modo a conseguir-se um determinado imbricamento entre os blocos, quando estes não possuem qualquer tipo de encaixe. Com esta particularidade construtiva, de facto não se pode classificar este pavimento de betão como rígido, antes se devendo designar por “pavimento articulado”. Estes pavimentos empregam-se principalmente em zonas urbanas, portuárias e industriais, quer para tráfego ligeiro, quer para tráfego pesado.

Além das possibilidades estéticas que oferecem os blocos de betão, com as suas formas e cores, a possibilidade de montar e desmontar o pavimento (a sua camada de desgaste), constitui uma vantagem quando é elevada a probabilidade de se produzir assentamento importante, haja que abrir valas para instalar infraestruturas ou quando se trata de um pavimento temporário. Para as estradas, este tipo de pavimento não encontra aplicação, dado as exigências do utente quando a qualidade de circulação, em particular a velocidades elevadas.

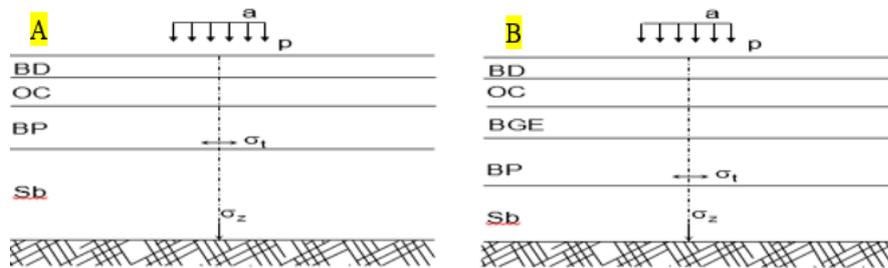
Os pavimentos em placas de betão armado são utilizados em alguns países para pavimentos industriais submetidos a cargas mais elevadas.

2.6.CONSTITUIÇÃO E MODO DE COMPORTAMENTO DOS PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS

Os pavimentos semirrígidos distinguem-se dos pavimentos flexíveis e dos pavimentos rígidos tendo em conta a sua constituição particular (Figura 2. 3 A e B). As camadas betuminosas superiores (camada de desgaste e camada de regularização) têm constituição idêntica à dos pavimentos flexíveis, sendo a camada de base que diferencia este tipo de pavimento. Esta camada é constituída por um material granular estabilizado com ligante hidráulico, em geral betão pobre. A camada de sub-base é, em geral, constituída por um material granular estabilizado mecanicamente (material de granulometria extensa) [37].

Para os pavimentos semirrígidos deve ainda distinguir-se entre as estruturas “direitas” e as estruturas “inversas”. No caso da estrutura “direta”, as camadas betuminosas apoiam-se diretamente sobre a base de elevada rigidez, constituída por um material granular estabilizado com ligante hidráulico. Nas

estruturas “inversas” existe a interposição de uma camada granular, não ligada, com espessura de 12 cm, entre as camadas betuminosas e a camada de betão pobre (Figura 2. 3 B).



- BD: Betão betuminoso em camada de desgaste
- OC: Outras camadas betuminosas
- BP: Betão pobre
- BGE: Base granular de granulometria extensa s
- SbG: Sub-base granular em material britado sem recomposição (“tout-venant”)

Figura 2. 3 Constituição do pavimentos semirrígidos: a) Sem base granular; b) Com base granular [35]

Neste tipo de pavimento é a camada de base, tendo em conta a sua elevada rigidez, que absorve a maior parte dos esforços verticais que deste modo atuam sobre o solo da fundação com valores muito reduzidos. Em certos casos, as camadas betuminosas ainda têm uma contribuição estrutural importante, em função de respetivas estruturas.

Estes pavimentos, além de degradação por fadiga, apresentam um modo de degradação específico, constituído pelo fendilhamento decorrente do necessário processo natural de retração na camada de base estabilizada com ligante hidráulico o qual gera esforços de tração superiores à sua resistência à tração.

Este fendilhamento desenvolve-se transversalmente, com espaçamento da ordem dos 3 a 5 metros transformando-os em pavimentos rígidos, mas com a agravante de passar a possuir juntas transversais abertas [35].

Atualmente não são conhecidos grandes estudos sobre o comportamento da permeabilidade das camadas drenantes, nem sobre eventuais influências das características geométricas, geologia da área envolvente e tráfego, em estradas com esta camada de desgaste.

A camada de desgaste encontra-se em contacto direto com o tráfego, devendo apresentar uma superfície lisa, uniforme, antiderrapante, garantir uma diminuição do ruído no contacto pneu/pavimento e assegurar um escoamento eficiente da água da chuva da superfície do pavimento, contribuindo

substancialmente para o conforto e segurança dos utentes. Adicionalmente, e do ponto de vista estrutural, deverão contribuir para a capacidade global do pavimento, distribuindo as tensões induzidas pelas cargas rolantes e devem ser impermeáveis de modo que as camadas subjacentes fiquem protegidas de eventuais infiltrações.

Por outro lado, existem camadas de desgaste que são especificamente construídas com um objetivo funcional, focalizadas somente nas características definidas anteriormente, não se valorizando a sua contribuição estrutural e não tendo mesmo uma função de impermeabilização, deixando essas funções para as camadas subjacentes.

Esta camada de regularização ou ligação tem como objetivo receber as cargas do tráfego, uniformizar as tensões e de seguida transferi-las às camadas de base que deve ainda ser uma superfície regular desempenada. Assim, a camada de base é a camada estrutural mais importante uma vez que recebe as cargas transmitidas pela passagem do tráfego, que posteriormente serão transferidas para a fundação [21].

O corpo do pavimento tem a principal função de degradar as cargas do tráfego aplicadas sobre o pavimento, subdividindo-se em camadas com diferentes qualidades e resistências. Cada camada tem, na fase de construção, a função de assegurar apoio para a realização da camada sobrejacente. No caso de se tratar de misturas betuminosas, a camada subjacente à camada de desgaste denomina-se por camada de regularização ou de ligação de acordo com as normas e no caso da camada de desgaste ser uma camada drenante designa-se a seguinte de subjacente à camada drenante.

A primeira secção experimental de camada drenante realizou-se em 1984, no Tirol Áustria (autoestrada A-12) sobre um pavimento de betão de cimento. Em 1989, perto de 10 % das camadas superficiais do sistema de autoestradas eram camadas drenantes.

A espessura da camada drenante pode ser limitada a 2 cm somente no caso de se querer praticar uma beneficiação parcial e económica de um pavimento com patologias superficiais. Neste caso, a camada não tem funções estruturais e a sua única função é a de melhorar o revestimento. Se se quiser que a camada participe na resistência estrutural do pavimento, é necessário adotar espessuras da ordem dos 4 a 5 cm [31].

As camadas drenantes caracterizam-se por serem camadas com melhor comportamento ao nível de: segurança e conforto na condução em períodos de precipitação, devido à elevada aderência que confere

aos pneumáticos mesmo em período de chuva; melhoria do ambiente sonoro por redução do ruído provocado ao nível da interface pneu/pavimento, devido à elevada porosidade que diminui significativamente a compressão do ar pois pode escapar através dos vazios da mistura [31].

2.7.BETÃO

O betão de cimento resulta do endurecimento da pasta de cimento após a mistura de cimento, de agregados grossos e finos e de água. Para além destes componentes básicos, o betão pode conter ainda aditivos e adjuvantes.

No MACOPAV [19] foram considerados, para a realização de camadas de pavimentos, vários tipos de betões com cimento, o que caracteriza suficientemente bem os tipos destes betões que é importante definir. As características daqueles materiais variam consoante se destinam a ser aplicados em camadas de sub-base, de base ou de desgaste. Assim foram considerados três grupos fundamentais de betões de cimento:

- Os betões de cimento, aplicados em camada de desgaste de pavimento rígidos, tendo sido considerado betões com resistências características à tração por flexão, aos 28 dias de idade, de 4 e 4,5 MPa e uma quantidade de cimento entre 300 e 350 kg/m³;
- Misturas de agregados com cimento, com uma dosagem inferior de ligante destinadas à realização de camadas de base em pavimento semirrígido ou camadas subjacentes às lajes de betão de cimento;
- Misturas de solo cimento, já descrita CEJAE [24] produzidas para aplicação em camadas de sub-base.

Sendo os pavimentos rígidos constituídos por betão, interessa apresentar este material seguindo o documento NP EN 206 e [38].

2.7.1. Classificação

O betão pode ser definido de duas formas, ou através de comportamento especificado ou de composição prescrita. Para definir um betão de comportamento especificado é necessário ter como referência a classificação e os requisitos que constam no documento NP EN 206 [38].

Quanto à classificação podemos começar pelas classes de exposição relacionadas com ações ambientais como se exemplifica nas Tabela 2.1 – 2.6 [38].

Tabela 2.1 Classes de exposição do betão sem risco de corrosão ou ataque [38]

Classe	Ambiente	Exemplos
X0	Para betão não armado e sem metais embebidos: todas as exposições, exceto ao gelo/degelo, à abrasão ou ao ataque químico.	Betão no interior de edifícios com muito pouca humidade do ar
	Para betão armado ou com metais embebidos: ambiente muito seco.	

Tabela 2.2 Classes de exposição do betão com corrosão induzida por cloretos não proveniente da água do mar [38]

Classe	Ambiente	Exemplos
XD1	Moderadamente húmido	Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar
XD2	Húmido, raramente seco	Piscinas; Betão exposto a águas industriais contendo cloretos
XD3	Ciclicamente húmido e seco	Partes de pontes expostas a salpicos de água contendo cloretos; Pavimentos; Lajes de parques de estacionamento de automóveis

Tabela 2.3 Classes de exposição do betão com corrosão induzida por carbonatação [38]

Classe	Ambiente	Exemplos
XC1	Seco ou permanentemente húmido	Betão no interior de edifícios com baixa humidade do ar; Betão permanentemente submerso em água
XC2	Húmido, raramente seco	Superfícies de betão sujeito a longos períodos de contacto com água; muitas fundações
XC3	Moderadamente húmido	Betão no interior de edifícios com moderada ou elevada humidade do ar; Betão no exterior protegido da chuva
XC4	Ciclicamente húmido e seco	Superfícies de betão sujeitas ao contacto com a água, fora do âmbito da classe XC2

Tabela 2.4 Classes de exposição do betão com corrosão induzida por cloretos da água do mar [38]

Classe	Ambiente	Exemplos
XS1	Ar transportando sais marinhos, mas sem contacto direto com a água do mar	Estruturas na zona costeira ou na sua proximidade
XS2	Submersão permanente	Partes de estruturas marítimas
XS3	Zonas de marés, de rebentação ou de salpicos	Partes de estruturas marítimas

Tabela 2.5 Classes de exposição do betão por ataque químico por meio dos agentes agressivos do betão [38]

Classe	Ambiente	Exemplos
XA1	Ligeiramente agressivo	Água do mar. Solos naturais e águas subterrâneas contendo agentes químicos agressivos para o betão e para os elementos metálicos embebidos.
XA2	Moderadamente agressivo	
XA3	Fortemente agressivo	

Tabela 2.6 Combinação de classes de exposição do betão [38]

Classe	Ambiente	Exemplos
XF1	Moderadamente saturado de água, sem produtos descongelantes	Superfícies verticais de betão expostas à chuva e ao gelo
XF2	Moderadamente saturado de água, com produtos descongelantes	Superfícies verticais de betão de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelantes transportados pelo ar
XF3	Fortemente saturado, sem produtos descongelantes	Superfícies horizontais de betão expostas à chuva e ao gelo
XF4	Fortemente saturado, com produtos descongelantes	Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelantes; Superfícies de betão expostas ao gelo e a salpicos de água contendo produtos descongelantes; Zona das estruturas marítimas expostas à rebentação e ao gelo.

Continuação da tabela 6 de Combinações de classes de exposição

Em cada combinação de classes de exposição ambiental devem ser satisfeitas, para o cimento (ou para a correspondente mistura) a utilizar e como requisitos da combinação, os valores prescritivos mais exigentes da mínima dosagem de cimento, da máxima razão água/cimento (e do teor de ar se for o caso) e da classe de resistência entre os valores de cada uma das classes de exposição ambiental da combinação. No caso de o cimento não ser comum às diferentes classes de exposição prevalece aquele que satisfizer a classe com os requisitos mais exigentes.

2.7.2. Classes de exposição

Os exemplos seguintes são unicamente informativos, podendo a seleção das classes de exposição depender das disposições do local de utilização do betão. Nas Figura 2. 4 e 2.8 são mostradas as diferentes classes de betão para as diversas zonas interiores e costeiras, exemplificando todos os tipos de betão.

A classificação das ações ambientais tem em consideração os dois principais fatores de ataque ao betão armado ou pré-esforçado: 1. o ataque sobre o betão (ataque pelo gelo-degelo ou ataque químico); 2. o ataque sobre as armaduras ou outros metais embebidos (corrosão induzida por carbonatação ou por iões cloreto) [38].

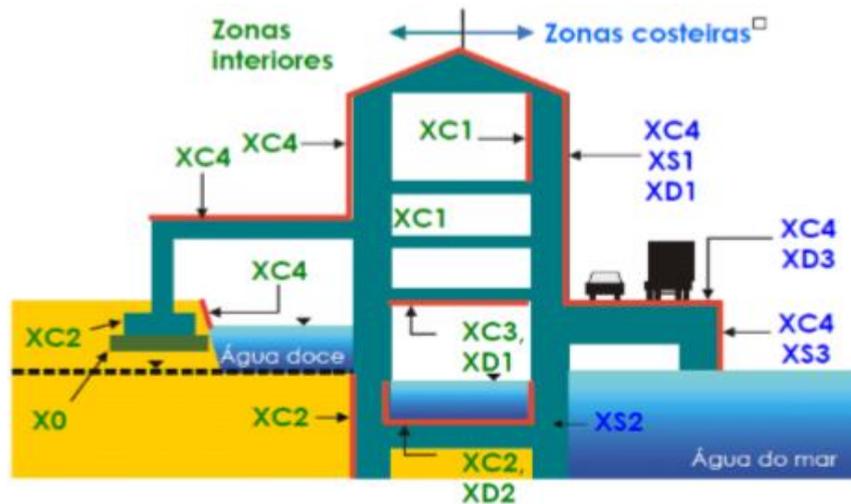


Figura 2. 4 Classes de exposição de acordo com as zonas em que se aplica determinado tipo de betão [38]

De acordo com a normalização das classes de exposição dos betões, esta designa classes para habitação e serviços (Figura 2. 4 e 2.7).

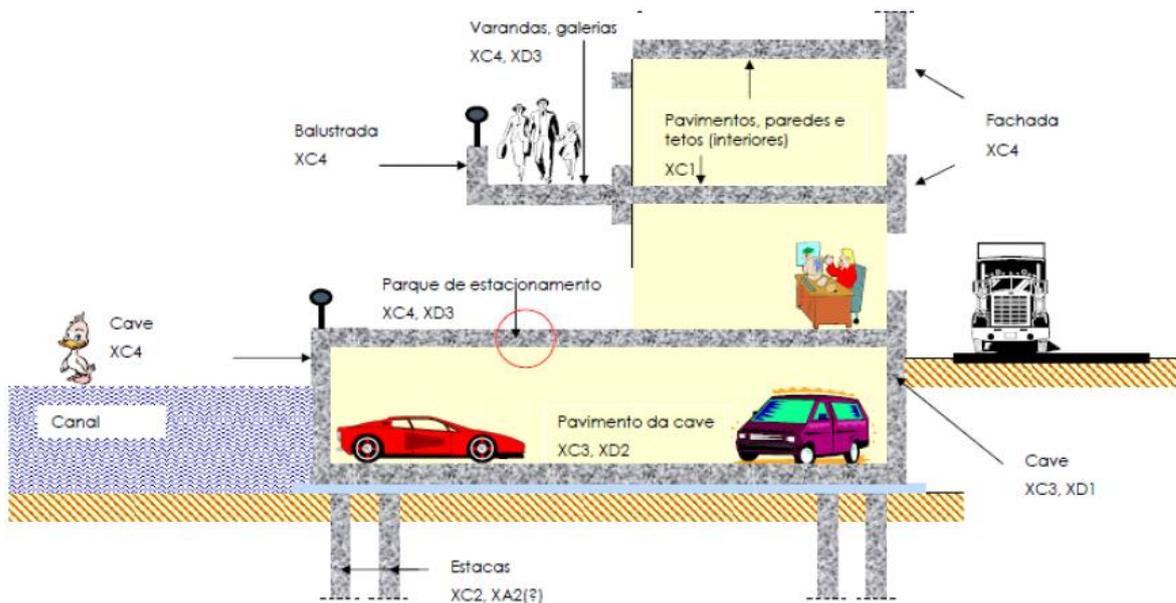


Figura 2. 5 Classes de exposição para habitações e serviços [38]

Tais como as classes referenciadas anteriormente também classes estipuladas para edifícios comerciais e industriais são semelhantes, embora apresentando algumas variações às anteriores, o que é exemplificado na Figura 2. 6.

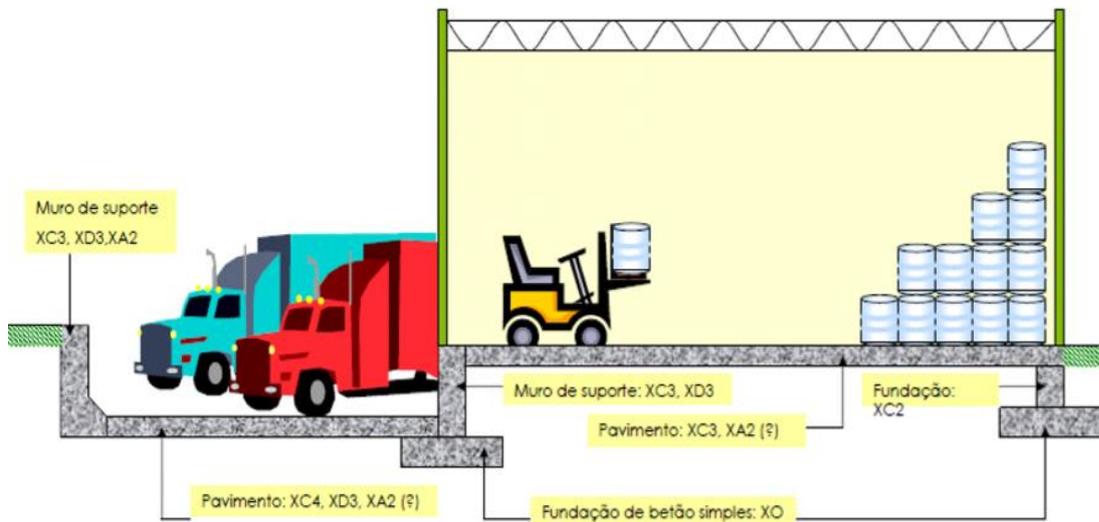


Figura 2. 6 Tipos de classes de exposição para edifícios comerciais e industriais [38]

As exposições definidas para as obras consideradas especiais, obras de arte e infraestruturas, são apresentadas na Figura 2. 7.

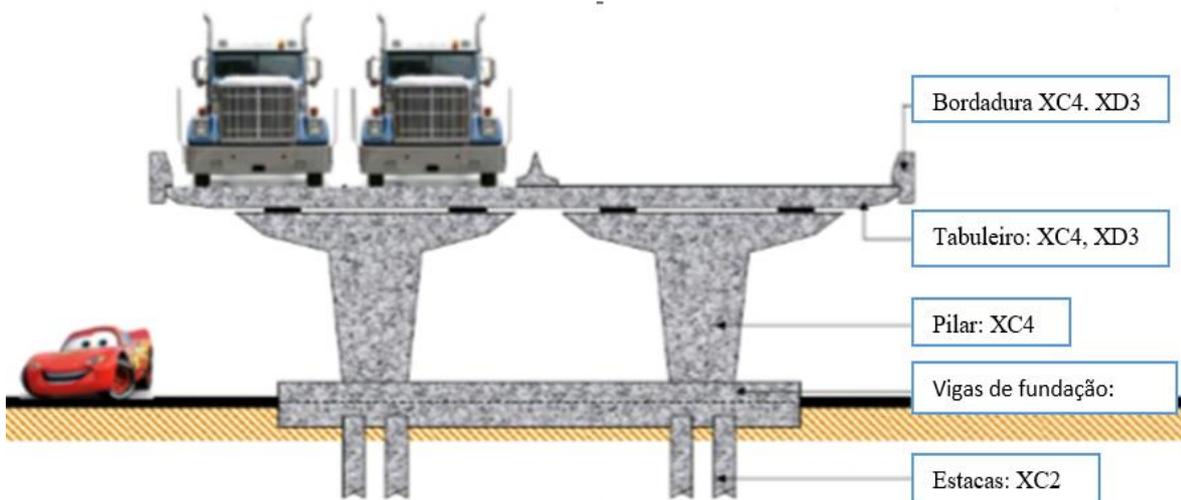


Figura 2. 7 Tipos de classes de exposição para obras de arte e infraestruturas [38]

Tais como todas as classes apresentadas anteriormente, também foram definidas classes de exposição para obras marítimas. Estas classes são mais específicas, isto devido ao seu grau de exposição perto da costa marítima (Figura 2. 8).

O betão pode encontrar-se sujeito a mais que uma das ações descritas das Tabela 2.1 a 2.6 ou como se verifica nas Figura 2. 4 a 2.8, pelo que as condições ambientais às quais está sujeito podem assim ter que ser expressas como uma combinação de classes de exposição.

Para um dado componente estrutural, diferentes superfícies do betão podem estar sujeitas a ações ambientais diferentes.



Figura 2. 8 Classes de exposição correntes para obras marítimas [38]

Relativamente a combinação de classes de exposição a LNEC E 462 [39] refere para ter em conta:

- A classe X0 e, em geral, a classe XC1 aplicam-se isoladas;
- A carbonatação é um processo comum a todas as estruturas de betão e a ação dos cloretos ou os ataques químicos e por gelo/degelo são específicos de certos ambientes;
- Na orla marítima (classes XS) o número de dias com temperaturas negativas (onde se poderiam aplicar as classes XF) é despidiendo, enquanto no interior, nomeadamente nas zonas com um total de 30 ou mais dias com temperaturas negativas pode haver combinação das classes XF2 com a XD (embora esta classe seja pouco frequente em Portugal);
- O ataque químico ao betão de fundações, obras de suporte de terras ou pavimentos em contacto com solos dá-se em solos agressivos ou em águas agressivas com nível freático atingindo as fundações e o betão de superestruturas de reservatórios ou condutas por ação de águas agressivas.

2.7.3. Classificação segundo a resistência à compressão

Quando o betão for classificado em relação à máxima dimensão do agregado, deve usar-se para a classificação a máxima dimensão do agregado mais grosso (D_{max}) do betão.

Quando o betão for classificado em relação à sua resistência à compressão, aplica-se a Tabela 2.7, para betão de massa volúmica normal e betão pesado ou a Tabela 2.8 para o betão leve. Para a classificação utiliza-se a resistência característica aos 28 dias obtida a partir de provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura (f_{ck} , cyl) ou a partir de provetes cúbicos de 150 mm de aresta (f_{ck} , cube) (Figura 2. 9). O valor característico é o valor que é alcançado com 95% de probabilidade [30]

Tabela 2.7 Classes de resistência à compressão (betão de massa volúmica normal e para betão pesado)

[30]

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros f_{ck} , cyl (N/mm ²)	Resistência característica mínima em cubos f_{ck} , cube (N/mm ²)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Nota: As classes apresentadas são as classes mais utilizadas em Portugal. Contudo, a NP EN 206 estabelece outras classes de resistência que vão desde a classe C8/10 até à classe C100/115

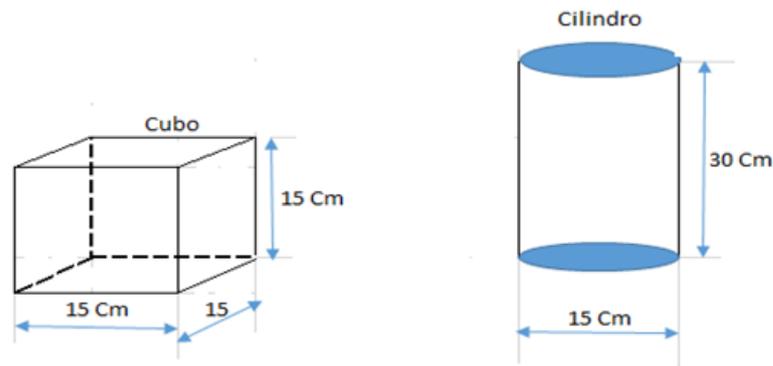


Figura 2. 9 Tipos de provetes para ensaios de resistência à compressão

Tabela 2.8 Classes de resistência à compressão para betão leve [30]

Classe de resistência à compressão	Resistência mínima em cubos ($f_{ck, cube}$) (N/mm ²)	Resistência característica em cilindros ($f_{ck, cyl}$) (N/mm ²)	Resistência característica em cubos ($f_{ck, cube}$) (N/mm ²)
LC8/9	8	9	9
LC12/13	12	13	13
LC16/18	16	18	18
LC20/22	20	22	22
LC25/28	25	28	28
LC30/33	30	33	33
LC35/38	35	38	38
LC40/44	40	44	44
LC45/50	45	50	50
LC50/55	50	55	55
LC55/60	55	60	60
LC60/66	60	66	66
LC70/77	70	77	77
LC80/88	80	88	88

a) Podem ser usados outros valores, desde que a relação entre estes e a resistência dos cilindros de referência esteja estabelecida com suficiente exatidão e esteja documentada.

2.7.4. Classificação segundo a densidade

A densidade do betão leve ou do betão pesado pode ser especificada através de um valor pretendido. No caso de betão leve a massa volúmica pode ser especificada igualmente através de uma classe (Tabela 2.9) [22].

Tabela 2.9 Classes de densidade do betão leve [30]

Classe	Massa Volúmica (kg/m ³)
D1,0	≥ 800 e ≤ 1000
D1,2	> 1000 e ≤ 1200
D1,4	> 1200 e ≤ 1400
D1,6	> 1400 e ≤ 1600
D1,8	> 1600 e ≤ 1800
D2,0	> 1800 e ≤ 2000

A variação da densidade depende da quantidade e densidade do agregado, da quantidade de ar aprisionado ou propositadamente introduzido e dos teores de água e de cimento, que por sua vez são influenciados pela dimensão máxima do agregado.

A densidade é inversamente proporcional ao volume, o que corresponde a dizer que quanto menor o volume ocupado por determinada massa, maior será a densidade. Por exemplo, a densidade do aço forjado é de 7860 kg/m³, enquanto o ar, ao nível do mar e a 15 °C, tem uma densidade de aproximadamente 1,225 kg/m³.

Como é constante a necessidade de realizar cálculos utilizando valores como o peso de materiais de construção civil como cimento, britas, areia, água betão, entre outros, cita-se a seguir alguns valores de densidade dos materiais. Assim, a Tabela 2.10 apresentam-se os valores da densidade de alguns materiais de construção.

Estes dados foram retirados no site de internet sobre a densidade dos materiais da construção de engenharia civil com as listas da equipa de OPERATION [40] que tem a experiência mais de 20 anos no seguimento de materiais de construção. A equipa OPERATION está situada em Belo Horizonte, Minas Gerais e oferece ao mercado uma nova alternativa de conhecimento e formação técnica para profissionais que estão ou queiram ingressar neste segmento.

Tabela 2.10 Densidade dos materiais de construção civil [40]

Material	Densidade kg/m ³	Materiais	Densidade kg/m ³
areia seca	1300 a 1600	bloco de argamassa	2200
areia húmida	1700 a 2300	cimento para pisos	2200 a 2300
areia fina seca	1500	cimento-amianto	1900
areia grossa seca	1800	lajotas cerâmicas	1800 a 2000
argila seca	1600 a 1800	tijolo furado	1100 a 1400
argila húmida	1800 a 2100	tijolo maciço	1800 a 2000
cal hidratada	1600 a 1800	tijolo sílico-calcáreo	1900 a 2200
cal hidráulica	700	tijolo poroso	1000 a 1100
cal em pó	1000	tijolo vitrificado	1900
cal virgem	1400 a 1600	argamassa cal hidráulica	2000 A 2200
cimento a granel	1400 a 1600	cobre	8900
cimento em sacos	1200	argamassa cimento/cal/areia	1900
gesso em pó	1400	argamassa cimento/areia	2100
gesso hidratado (em bloco)	1800 a 2600	argamassa de gesso/estruque	1400
minério de ferro	2800	argamassa de cal e areia	1700
terra apiloada seca	1000 a 1600	Betão simples	2400
terra apiloada húmida	1600 a 2000	Betão armado	2500
terra arenosa	1700	Betão de argila expandida	2000
terra vegetal seca	1200 a 1300	estruque de argamassa de cimento	2000
terra vegetal húmida	1600 a 1800	estruque de argamassa de cal	1700
entulho de obras	1500	estanho	7400
aço	7800	ferro forjado	7900
alumínio	2600	ferro fundido	7400
bronze	8500	latão	8500

2.8.CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade está relacionada com a consistência dos materiais utilizados que deve ser especificada através de uma classe ou, em casos especiais, através de um valor pretendido, tendo em consideração o método de ensaio mais adequado, o qual pode ser:

- Ensaio de Abaixamento (Tabela 2.11 e 2. 13)
- Ensaio de Vêbê (Tabela 2.13)
- Ensaio de Compactação (Tabela 2.14)
- Ensaio de Espalhamento (Tabela 2.15)

Tabela 2.11 Classe de abaixamento do betão fresco [30]

Classe	Abaixamento (mm)
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5	≥ 220

Tabela 2.12 Recomendação e Observação de abaixamento do betão fresco [30]

Recomendação	Observação
Betão para bombear	Classe ≥ S3
Pavimentos com meios tradicionais de colocação e acabamento	Classe ≥ S3
Superfícies com betão à vista	Classe ≥ S3
Elevado tempo de transporte e/ou clima quente	Classe ≥ S3
Betões de alta resistência	Classe ≥ S4

Tabela 2.13 Classes Vêbê do betão fresco [30]

Classe	Tempo ensaio de Vêbê
V0	≥ 31
V1	30 a 21
V2	20 a 11
V3	10 a 6
V4	5 a 3

Tabela 2.14 Classes de compactação do betão fresco [30]

Classe	Grau de compatibilidade
C0	≥ 1,46
C1	1,45 a 1,26
C2	1,25 a 1,11
C3	1,10 a 1,04
C4	< 1,04

a) Aplica-se somente ao betão leve

Tabela 2.15 Classes de espalhamento do betão fresco [30]

Classe	Diâmetro de espalhamento (mm)
F1	≤ 340
F2	350 a 410
F3	420 a 480
F4	490 a 550
F5	560 a 620
F6	≥ 630

A aplicação em obra deste tipo de betão pode ser realizada utilizando cilindros compactadores ou através de agulhas vibradores. No primeiro caso a dosagem de água pode ser estudada em laboratório pelos mesmos procedimentos utilizados nas camadas granulares, enquanto no caso dos betões vibrados, a dosagem de água é mais elevada, por forma a permitir a utilização de vibração. A experiência de execução de camadas de betão pobre vibrado tem mostrado que, para obter adequadas características de trabalhabilidade, é necessário utilizar teores em cimento mais elevados.

Os betões de agregados com cimento hidráulicos, com menor dosagem de cimento que podem ser aplicadas em camadas de base ou sub-base sob camadas betuminosas (semirrígidos) ou sob as lajes de betão de cimento (pavimentos rígidos).

No caso dos pavimentos rígidos, para além de se melhorarem as condições de apoio das lajes de betão de cimento, pretende-se limitar o fenómeno de erosão das camadas de base, que pode ocorrer na zona das juntas de construção ou retração. Admite-se que o fenómeno de erosão possa ser bastante reduzido adotando uma dosagem mínima de ligante de 140 kg/m³ de mistura.

2.9.CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A DURABILIDADE

Atualmente, o betão pronto é produzido com recurso a adjuvantes e a adições minerais que asseguram a trabalhabilidade pretendida sem comprometer a durabilidade. É sabido que a resistência à compressão não é a chave para a durabilidade do betão [41].

Os avanços surgidos na tecnologia do betão deverão estar intimamente ligados com a rapidez de execução das estruturas, com a durabilidade das mesmas e com preocupações ambientais. Assim, tornou-se possível fabricar betões com menor quantidade de cimento e maior relação água/cimento (A/C) e manter a resistência à compressão. Contudo, estas alterações podem comprometer a durabilidade do material. O seu uso pode ser estendido a diversos tipos de estruturas, aproveitando uma melhoria significativa de determinadas características, nomeadamente da sua durabilidade, contribuindo decisivamente para a melhoria do desempenho do material.

Em caso de betões especiais, tornar-se-á necessário definir as classes ou valores pretendidos para as características que os tornam especiais, por exemplo: classe de massa volúmica ou o valor pretendido, no caso de betões leves ou pesados.

Com uma especificação adequada no caderno de encargos, tanto a quantificação do custo da obra, como a especificação do betão pela entidade construtora, ou pelo subempreiteiro quando aplicável, ficam substancialmente facilitadas [42].

Para assegurar a durabilidade das estruturas são impostos limites a determinadas características do betão da construção, consoante o ambiente envolvente a que a estrutura vai ficar sujeita. A NP EN 206 [38] remete este assunto para a especificação E 464, exceto no que respeita à classe de exposição (Tabela 2.16).

Tabela 2.16 Limites para as características do betão[38]

Tipo de cimento ⁽¹⁾	Classe de exposição	Recobrimento nominal mínimo	Dosagem de cimento mínima	Razão A/C máxima	Classe da Resistência Betão Normal	Mínima Betão Leve	
	X0			-	C12/15	-	
CEM I; CEM II/A(2)	XC1	25 mm	240 kg/m ³	0,65	C25/30	LC25/28	
	XC2	35 mm					
	XC3	35 mm	280 kg/m ³	0,60	C30/37	LC30/33	
	XC4	40 mm					
	XS1 / XD1 (4)	45 mm	360 kg/m ³	0,45	C40/50	LC40/44	
	XS2 / XD2 (4)	50 mm					
	XS3 / XD3 (4)	55 mm	380 kg/m ³	0,40	C50/60	LC50/55	
	XF1		280 kg/m ³	0,60	C30/37	LC30/33	
	XF2(5)						
	XA1(4)		340 kg/m ³	0,55			
	XA2(4)		360 kg/m ³	0,50	C35/45	LC35/38	
	XA3(4)		380 kg/m ³	0,45	C40/50	LC40/44	
	CEM II/B(2); CEM III/A(3); CEM IV(3); CEM V/A(3)	XC1	25 mm	260 kg/m ³	0,65	C25/30	LC25/28
		XC2	35 mm				
CEM IV/A; CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/ B; CEM V; CEM II/B ⁽⁴⁾ ; CEM II/A D	XC3	35 mm	300 kg/m ³	0,55	C30/37	LC30/33	
	XC4	40 mm					
CEM IV/A; CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/ B; CEM V; CEM II/B ⁽⁴⁾ ; CEM II/A D	XF1		300 kg/m ³	0,55	C30/37	LC30/33	
	XF2(5)						
CEM IV/A; CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/ B; CEM V; CEM II/B ⁽⁴⁾ ; CEM II/A D	XS1 / XD1	45 mm		0,50	C30/37	LC30/33	
	XS2 / XD2	50 mm		0,55			
CEM III/A; CEM III/ B; CEM V; CEM II/B ⁽⁴⁾ ; CEM II/A D	XS3 / XD3	55 mm	340 kg/m ³	0,45	C35/45	LC35/38	
	XA1		320 kg/m ³	0,55	C30/37	LC30/33	
CEM III/A; CEM III/ B; CEM V; CEM II/B ⁽⁴⁾ ; CEM II/A D	XA2		340 kg/m ³	0,50	C35/45	LC35/38	
	XA3		360 kg/m ³	0,45			

(1) De acordo com a especificação E 464, em vez dos cimentos indicados, podem ser utilizadas misturas, obtidas pela junção de um cimento do tipo CEM I ou CEM II/A com adições, cuja composição resultante seja equivalente à de um dos cimentos indicados.

(2) Não aplicável aos cimentos II/A-T e II/A-W e aos cimentos II/B-T e II/B-W, respetivamente.

(3) Não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% de clínquer Portland, em massa.

(4) Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L e II/B-LL.

(5) Teor mínimo de ar de 4%.

2.10. UTILIZAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO

Agregados reciclados são provenientes da britagem de resíduos de betão e quando reutilizados formam o betão reciclado, podendo existir alguma fração de agregados naturais. Os agregados reciclados já vêm sendo reutilizados em obras civis desde o Império Romano. Em 1860 foram utilizadas sobras de blocos de betão na produção de artefactos de betão na Alemanha. Entretanto, somente a partir de 1928 começaram as pesquisas para avaliar o efeito do consumo de cimento, da quantidade de água e da granulometria dos agregados e da resistência do betão reciclado [43].

O processo da determinação da resistência à compressão do betão com agregados reciclados pode ser realizado através da aplicação e medição de forças em provetes e artefactos de betão, avaliando como os mesmos estão se comportando diante do carregamento. Comparando as resistências entre o betão reciclado e o convencional, pode dizer-se que o betão reciclado tem valores inferiores aos do que é estabelecido para o betão convencional [44].

Os principais geradores de resíduos de betão são: as fábricas de pré-moldados, centrais de betão, demolições de construções e de pavimentos rodoviários de betão. É possível utilizar os resíduos de betão como agregado reciclado para produção de betão. Entretanto eles possuem algumas diferenças entre suas propriedades e a dos agregados naturais, principalmente relacionadas com a argamassa do betão original aderida à superfície dos mesmos. Esta camada de argamassa influencia nas propriedades do agregado e nas do betão feito com ele, seja no estado fresco ou endurecido [45].

O uso de agregado reciclado é adequado para a produção de betão não estrutural, porém, é possível usar esse tipo de agregado em dosagens estruturais sem nenhum risco, desde que seja utilizado até 10% de agregado graúdo reciclado, pois algumas das propriedades do betão não são muito influenciadas. Na fração miúda é recomendado o uso de 5% [45].

Para a utilização de material reciclado em betão existe uma recomendação internacional, quanto à percentagem entre agregados reciclados e naturais, recomendando-se que os agregados graúdos sejam pelo menos 80% naturais [46].

A necessidade de conhecer os resíduos envolvidos durante o processo, assim como aqueles provenientes dos materiais de demolição levou a uma pesquisa aprofundada. Com isso foi possível identificar que na comunidade europeia o valor estimado fica em torno de 170 milhões de toneladas/ano e com isso fornece dados percentuais, que pode ser explicado de acordo com a Figura 2. 10. Assim, o

betão representa com 41% dos resíduos de demolição, sendo os tijolos e blocos responsáveis por 40%, os materiais asfálticos correspondem 12%, já os materiais cerâmicos ficam com 7% do total [47].

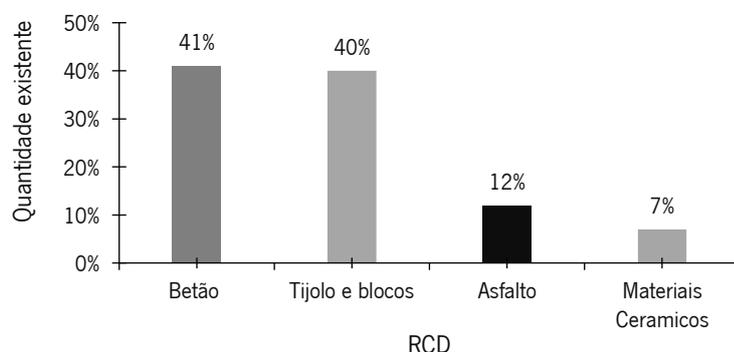


Figura 2. 10 Percentagem de alguns resíduos da construção e demolição na comunidade europeia [47]

Na Figura 2. 11 apresenta-se os agregados reciclados de betões da dimensão de 10/30 da companhia de RCD “Resíduos de construção e demolição, SA” reproduzimos para a medida de 10/14 e 4/10, e que serão utilizados neste trabalho para a fabricação de betão drenante.



Figura 2. 11 Agregado reciclado de peças pré-moldadas de betão

O agregado reciclado é obtido com uma melhor qualidade quando se faz um processo seletivo do resíduo dentro do próprio estaleiro de obra, separando o material a ser aproveitado do material descartável. Outro modo de se conseguir boa qualidade dos agregados é pelo origem e desmantelamento seletivo, em que os materiais são separados dos tipos a serem reciclados são retirados de acordo com o tipo de material.

A durabilidade é uma característica quantitativa dos materiais que indica a sua capacidade de atender ou não à vida útil exigida para os mesmos. A vida útil de um pavimento é o tempo no qual o mesmo permanece em uso mantendo as características que foram exigidas no momento, da concepção que ele compõe. Logo, a vida útil é a quantificação da durabilidade do pavimento.

As propriedades do betão como resistência, durabilidade e permeabilidade são diretamente influenciadas e controladas pelo número, tipo, tamanho e intercomunicabilidade dos poros presentes na pasta de cimento, nos agregados e na interface entre a pasta de cimento e os agregados [48].

Em comparação com a pasta de cimento, os agregados naturais possuem geralmente um volume de poros muito menor, com isso espera-se que a permeabilidade do agregado sejam também muito menor e que, conseqüentemente, a permeabilidade dos betões e argamassas seja menores que das pastas. Apesar disso, segundo (Metha 1994) [49], a permeabilidade da argamassa do betão é maior que a permeabilidade da pasta de cimento correspondente devido às microfissuras que estão presentes na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Esta permeabilidade aumenta com o tamanho do agregado.

A porosidade dos agregados afeta negativamente a resistência à compressão, resistência à abrasão, a absorção e o módulo de elasticidade dos betões, foco deste trabalho, podendo influenciar na durabilidade deste, que são propriedades interrelacionadas [50].

Segundo o (Powers 1960) [51], nas pastas de cimento frescas, os espaços preenchidos pela água constituem um sistema de poros capilares contínuo e interconectado. As formações da camada de gel no início da hidratação comprimem os capilares sem, no entanto, torná-los descontínuos, ou seja, há uma divisão dos poros capilares em segmentos que são interconectados pelos poros de gel. À medida ... que a hidratação se completa, os poros capilares tornam-se menos contínuos com a formação da camada de gel. Entretanto, se a relação a/c for muito alta (acima de 0,5) a completa hidratação não irá formar uma camada de gel suficiente para destruir a continuidade dos poros capilares.

2.11. BETÕES DRENANTES

A função primária de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante o seu período de vida, sob as ações do tráfego, e nas condições climáticas que ocorrem.

Relativamente à sua constituição, um pavimento rodoviário é considerado como um sistema multiestratificado, formado por várias camadas de espessura finita, apoiadas na fundação constituída pelo terreno natural. Essas diferentes camadas dispõem-se, normalmente, com qualidade e resistência decrescentes, de cima para baixo, em consonância com a progressiva redução dos esforços em profundidade [41].

As ações climáticas, representadas pela temperatura e pela água, têm uma influência relevante no comportamento e evolução dos pavimentos, em particular naqueles que possuem uma componente betuminosa mais expressiva e também uma elevada componente granular.

Algumas características da superfície, nomeadamente a textura ou, de um modo geral, as qualidades antiderrapantes, a cor e outras qualidades óticas e as propriedades associadas à geração de ruído de rolamento, estão diretamente relacionadas com a constituição da camada superior dos pavimentos.

Resumindo, a camada de desgaste deve garantir:

- Um bom coeficiente de atrito pneu/pavimento, quer em condições de piso seco, quer molhado;
- Um nível de ruído pneu/pavimento dentro dos limites exigidos, como adequadas características óticas;
- Uma superfície regular, que possibilite a circulação em condições de conforto, economia e segurança;
- Uma adequada macrotextura para permitir o escoamento das águas [41].

2.11.1. Juntas em pavimentos rodoviários de betão

As juntas transversais são construídas no sentido da largura da laje do betão, sendo os tipos principais, quanto à sua serventia, os seguintes:

- Retração (ou contração);
- De retração com barras de transferência;
- De construção;
- De expansão (ou dilatação).

Quanto as juntas transversais de retração (ou contração) a sua função é controlar as fissuras devidas à contração volumétrica do betão.

A junta é formada pela criação de uma seção enfraquecida na laje de betão por meio de um corte ou ranhura na superfície do pavimento, até uma profundidade adequada.

Este corte pode ser feito enquanto o betão se apresentar plástico (pela inserção de um perfil metálico ou de plástico rígido), ou após o seu endurecimento inicial, com o emprego de uma serra circular dotada de disco diamantado [52].

A profundidade do corte deve ficar entre $1/4$ e $1/6$ da espessura da laje obedecendo-se a um mínimo de 4 cm, tanto para a junta moldada quanto para a serrada.

Deve-se levar em conta que as lajes de grande espessura exigem um limite superior de profundidade da ranhura. Quando serrada, deve-se ainda observar uma profundidade mínima igual ao diâmetro máximo do agregado

A abertura do corte pode variar entre 3 mm (mínimo, quando serrado) a 10 mm (máximo, quando aberta no betão fresco); um valor muito usual é de 6 mm de abertura. Recomenda-se o arredondamento das bordas da junta, quando moldada, com o auxílio de uma ferramenta apropriada (desempenadeira de bordo). As juntas de retração serradas na Figura 2.12 e as juntas de retração abertas no betão fresco da Figura 2. 13 exemplificam os tipos adotados para as juntas transversais de contração [52].

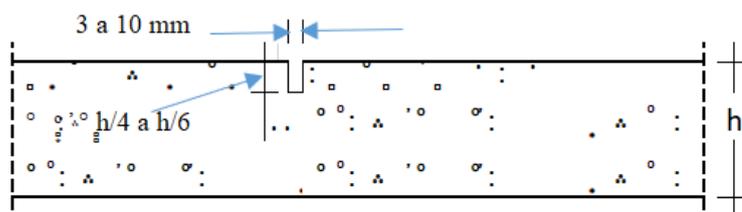


Figura 2.12 Juntas transversais de retração serrado [52]

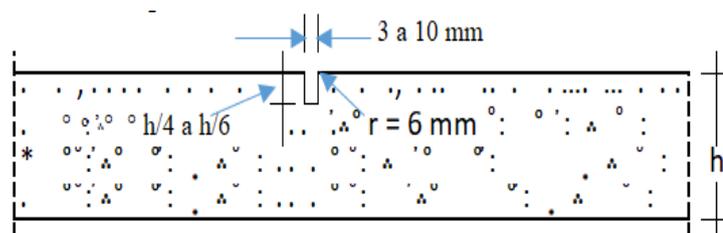


Figura 2. 13 Juntas transversais de retração aberta no betão fresco [52]

O espaçamento entre as juntas de retração deve atender às necessidades de controle, não só das fissuras devidas à variação inicial do volume de betão, como das fissuras adicionais, devidas ao empenamento da laje.

O cálculo das tensões devido ao empenamento restringido é profundamente teórico e simplificado não levando em conta, por exemplo, a influência da deformação lenta do betão drenante.

Portanto, a fixação das diretrizes dos projetos de juntas que combatessem os efeitos transversais do empenamento foi baseada em estudos experimentais e na observação de pavimentos em serviço, sob tráfego misto, sendo estreitamente dependente do padrão adotado de juntas transversais de retração, cuja função, dessa forma, é dupla.

O espaçamento necessário entre juntas transversais de retração deve ser fixado levando em conta quatro variáveis:

- o tipo de agregado graúdo empregado na confecção do betão;
- as condições ambientais;
- o atrito entre a laje e a camada subjacente;
- o tipo de tráfego.

As regiões cujo clima apresenta grandes variações de temperatura ou de humidade, são as que exigem menores distâncias entre as juntas.

Por outro lado, a experiência mostra que o emprego de seixo rolado (ou cascalhos) como agregado graúdo, impede a adoção de distâncias maiores entre as juntas, o que não acontece quando o agregado graúdo é britado; neste deve ser observado, também, que a composição mineralógica do agregado, por seu maior ou menor coeficiente de expansão térmica, é de grande importância na fixação do espaçamento.

Já o atrito entre a laje de betão e a camada subjacente a ela, é inversamente proporcional ao espaçamento adequado entre as juntas transversais de retração.

Uma indicação valiosa é fornecida na Tabela 2.17, que condiciona a distância ou espaçamento entre as juntas transversais de retração, ao tipo de agregado graúdo usado no betão.

Tabela 2.17 Espaçamento recomendado entre as juntas transversais

Tipo de agregado graúdo	Espaçamento recomendado entre juntas transversais (m)
Pedra britada granítica	Até 7,5
Pedra britada calcária, Silico-calcária ou pedregulho de calcário	Até 6,0
Seixo rolado, cascalho ou escória com dimensão máxima menor que 19 mm	Até 4,5

A experiência tem demonstrado que uma distância máxima de 6 m entre as juntas transversais é perfeitamente adequada às nossas condições gerais (Figura 2. 14).

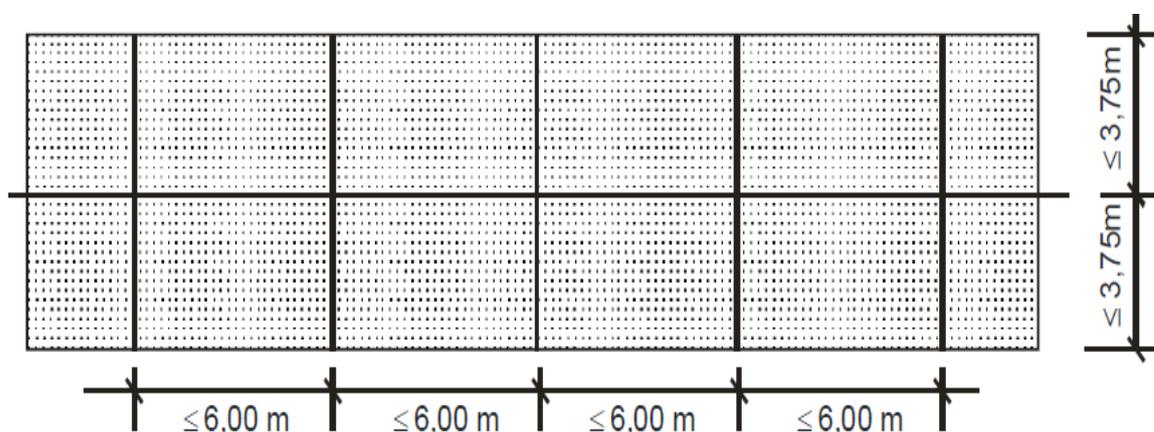


Figura 2. 14 Largura e comprimento recomendados para laje de pavimento rodoviária de betão [52]

2.11.2. Capacidade de rolamento

O princípio geral de uma roda de um veículo que passa sobre um pavimento transmite a este certo esforço através de superfície do contacto do pneu com o pavimento. A superfície de contacto tem aproximadamente uma forma elíptica e a suas dimensões dependem do tipo de pneu, da pressão de enchimento e da carga descarregada pela roda (Figura 2. 15). Para o efeito de dimensionamento da superfície do pavimento de contacto considera-se, em geral semelhante a um círculo. De um modo aproximado pode dizer-se que a área A da superfície de contacto é dada pela Equação (1)

$$A = \frac{P}{p'} \quad (1)$$

Sendo: P = A carga por roda
 P' = a pressão de enchimento

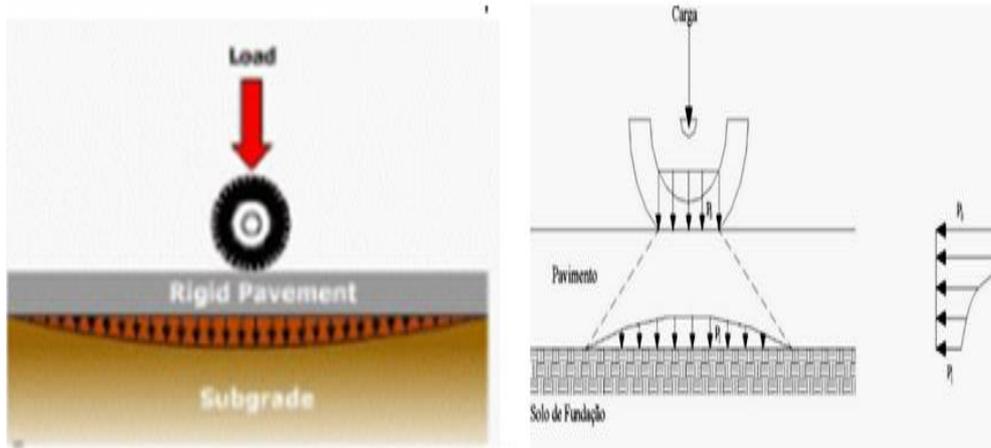


Figura 2. 15 Distribuição de tensões verticais e horizontais devido a rodas [24]

Os esforços transmitidos são ações verticais associadas ao peso, sob a forma de pressão exercida na superfície de contacto, e forças tangenciais, necessárias ao rolamento do veículo ou então manifestadas durante a ocorrência de derrapagem e travagem (Figura 2. 15). As ações tangenciais têm sobretudo influência na evolução da textura da superfície (rugosidade e polimento dos agregados) e da sua regularidade (desagregação de elementos do agregado). As ações verticais são as mais determinantes do funcionamento estrutural do pavimento.

Por outro lado, um betão de alta porosidade pode segregar a partir do momento em que não consiga assegurar uma deformação uniforme capaz de ultrapassar as obstruções. Isto pode causar a separação de partículas grossas do agregado, perto de espaços confinados da cofragem. Neste caso, esse comportamento pode ser corrigido através da redução da máxima dimensão do agregado (MDA) e do volume de agregados. Em suma, para reduzir a possibilidade de uma separação ou segregação dos sólidos será necessário implementar as seguintes ações, que nem sempre se equivalem nos seus efeitos:

- Limitar o teor de agregados;
- Reduzir a máxima dimensão do agregado (MDA);
- Reduzir a taxa de água e finos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIO

Este capítulo apresenta a forma como foi realizada a parte prática da tese, referindo o plano de ensaios realizado, os materiais utilizados, as composições adotadas para os betões, e os ensaios realizados aos betões frescos e endurecidos.

3.1. PLANO DE TRABALHOS

O plano de trabalhos desta tese está dividido em três fases.

A primeira parte o estudo desenvolveu-se utilizando agregados naturais em que, a partir de uma curva granulométrica dos agregados já utilizada no betão asfáltico drenante para pavimentos de estradas, foram concebidos betões de cimento drenantes com diferentes relações água/cimento e tempos de vibração para servir de referência aos betões com agregados reciclados.

A curva granulométrica dos agregados tem um fuso designado no Caderno de Encargos da Infraestruturas de Portugal de PA 12.5, tendo uma dimensão máxima dos agregados de 12.5 mm. Para a obtenção de uma misturas de agregados respeitando este fuso granulométrico foram utilizados agregados com as dimensões de 0/4, 4/10 e 10/14.

No início das fases do trabalho estuda-se a influência da relação água/cimento e da vibração nas propriedades relacionadas com a permeabilidade do betão de cimento, ou seja, o escoamento da água, a porosidade e as propriedades mecânicas do betão drenante.

Nesta primeira fase do trabalho, com agregados naturais foram produzidos betões de cimento com razão água/cimento (A/C) de 0,30, e cimento de 300 kg/m³, 0,35 e cimento de 350 kg/m³ e 0,40 e cimento de 400 kg/m³. Para cada um destes betões os provetes foram vibrados 20, 40 e 60 segundos, totalizando 9 tipos de provetes. Os betões produzidos foram designados de “BN 0,30”, “BN 0,35”, “BN 0,40”, sendo a sigla BN referente a betão com agregados naturais e o número referente à razão água/cimento.

Na segunda fase do trabalho, com agregados naturais foram produzidos betões de cimento com razão água/cimento (A/C) de 0,30, 0,35 e 0,40 e cimento de 300 kg/m³. Os betões foram vibrados 20, 40 e 60 segundos.

Para este estudo, realiza-se ensaios ao betão fresco e ao betão endurecido para as duas fases, tendo-se realizado os seguintes ensaios a seguir indicados.

Ensaio de betão fresco:

1. Ensaio de abaixamento
2. Ensaio de vêbê
3. Ensaio de espalhamento
4. Ensaio de massa volúmica fresca
5. Ensaio de determinação do teor de ar

Ensaio de betão endurecido:

6. Ensaio de Permeabilidade por K_{LCS}
7. Ensaio de permeabilidade por K_{FH}
8. Ensaio de absorção por imersão
9. Ensaio de porosidade através da imagem
10. Ensaio de absorção por capilaridade
11. Ensaio de resistência à compressão
12. Ensaio de desgaste por cântabro

A realização destas duas fases do plano de trabalhos permitiu obter um betão com agregados naturais a ser considerado como “referência” para o estudo dos betões com agregados reciclados. Foi considerado para betão de referência o betão com uma razão água/cimento de 0,30, 0,35 e 0,40 e o tempo de vibração de 20, 40 e 60 segundos e a quantidade do cimento de 300 kg/m³ e com uma designação de BN (Betão Naturais) e no final analisámos e escolhemos A/C de 0,30, vibração de 40 segundos e cimento de 300 kg/m³ para ser referência na terceira fase, com uma designação de BN-REF (Betão Naturais de Referência).

A terceira fase do plano de trabalhos, consistiu no estudo do betão drenante com agregados reciclados tendo-se utilizado 10%, 20% e 30% de RCD, mantendo-se os restantes parâmetros do betão de referência, nomeadamente razão água/cimento de 0,30 e um tempo de vibração de 40 segundos e 300 kg/m³ de cimento. A utilização de RCD obrigou a que a mistura dos agregados fosse alterada de modo a continuar a cumprir o fuso PA 12,5 definido para betões asfálticos drenantes.

Os betões com agregados reciclados foram designados por “B-RCD 10%”, “B-RCD 20%”, “B-RCD 30%”, sendo a sigla B-RCD referente a betão com RCD seguindo-se o número com a percentagem de RCD. Em termos de agregados reciclados, utilizou-se agregados com as dimensões 4/10 e 10/14.

Para este estudo, realizaram ensaios ao betão fresco e ao betão endurecido, tendo-se realizado os seguintes ensaios a seguir indicados.

Ensaio de betão fresco:

1. Ensaio de abaixamento
2. Ensaio de vêbê
3. Ensaio de massa volúmica
4. Ensaio de determinação do teor de ar

Ensaio de betão endurecido:

1. Ensaio de permeabilidade por K_{LCS}
2. Ensaio de permeabilidade por K_{FH}
3. Ensaio de absorção por imersão
4. Ensaio de absorção por capilaridade
5. Ensaio de resistência à compressão
6. Ensaio de resistência à tração
7. Ensaio de resistência à Flexão
8. Ensaio de desgaste por cântabro
9. Ensaio de absorção por sulfato magnésio
10. Ensaio de módulo elasticidade
11. Ensaio de gelo degelo
12. Ensaio de volume vazios do betão
13. Ensaio de mancha de areia
14. Ensaio do Pendulo Britânico
15. Ensaio de textura
16. Ensaio de módulos Complexos
17. Ensaio de resistência ao fendilhamento por fadiga

Os provetes de betão foram sujeitos a uma cura de 28 dias a 18°-20°C em câmara húmida.

3.2.MATERIAIS UTILIZADOS

Na produção dos betões drenantes estudados neste trabalho utilizou-se cimento Portland CEM I 42,5 R, agregados finos de dimensão 0/4 e agregados grossos de dimensões 4/10 e 10/14, assim como agregados grossos de resíduos de construção e demolição (RCD), as dimensões 4/10 e 10/14 e água. Os agregados grossos foram devidamente produzidos para betões drenantes baseado no caderno de encargos de modo a ter a granulometria PA 12.5. Na produção dos agregados grossos, teve-se o cuidado de se ajustar o processo de fabrico de moagem até se concluir que estes teriam uma forma mais esférica e arredondada.

3.2.1. Cimento

Para a produção dos betões utilizados neste trabalho recorreu-se a um cimento Portland CEM I 42,5 R.

A NP EN 197-1 [53] inclui os requisitos mecânicos, físicos, químicos e de durabilidade. Relativamente aos requisitos mecânicos estão previstas três classes de resistência de referência: classe 32,5, classe 42,5 e classe 52,5. Pode dizer-se que os cimentos das classes 32,5 e 42,5 são adequados para obras correntes. Os cimentos da classe 52,5 são adequados para obras onde se exige elevada resistência mecânica, pontes de grande vão, por exemplo, e na prefabricação porque atingem em menos tempo resistências mecânicas mais elevadas que os das outras classes.

Os betões drenantes funcionam da seguinte maneira. Quanto maior a sua porosidade menor será a sua resistência mecânica, motivo de tal importância na escolha do ligante. Com base neste fator, o Cimento Portland CEM I 42,5 R foi o selecionado, sendo um ligante de características indicadas nas Tabelas 3. 1 e 3. 2.

Tabela 3. 1 Características do Cimento Portland CEM I 42,5 R

Propriedades	Valores
Diâmetro acumulado para 10 % (μm)	1,33
Diâmetro acumulado para 50 % (μm)	9,3
Diâmetro acumulado para 90 % (μm)	24,2
LOI (%)	2,33
Peso Específico (kg/m^3)	3120
Superfície Específica de Blaine (cm^2/g)	4072

Tabela 3. 2 Resistência do cimento Portland CEM I 42,5 R

Idade	Resistências (MPa)	
	Flexão	Compressão
2	5,6	31,8
7	7,5	47,0
28	8,5	55,5

3.2.2. Agregados naturais

Os agregados podem designar-se por finos (dimensão superior das partículas menor ou igual a 4 mm) ou grossos (dimensão superior das partículas maior ou igual a 4 mm e dimensão inferior das partículas maior ou igual a 2 mm). Os agregados também podem ser naturais, artificiais ou reciclados. Os

agregados naturais apenas foram sujeitos a processamento mecânico, mantendo a natureza não rugosa das superfícies. Como materiais artificiais temos as resultantes da fragmentação propositada de rochas, tais como a brita, areias de trituração ou o pó de pedreira [16].

As areias, principalmente as de origem natural, podem conter impurezas em quantidades que recomendam a sua não utilização como agregado para argamassas de betões. A NP EN 13139 [54] fixa os limites aceitáveis dessas impurezas que podem ser teor de finos ou teor de enxofre total, por exemplo. As areias artificiais têm, contudo, a vantagem de terem uma maior aderência, devido à sua superfície rugosa. A aderência entre a pasta de cimento e o agregado é consequência sobretudo das protuberâncias e reentrâncias deste. A pasta de cimento envolve e preenche estas saliências e naturalmente os agregados artificiais, devido à maior aderência que proporcionam, permitindo então maiores resistências.

Para a formulação dos betões drenantes determinou-se a distribuição granulométrica dos agregados naturais, tal como indicado na Figura 3. 1 A) enquanto na Figura 3. 1 B) apresenta-se a curva granulométrica para o betão drenantes.

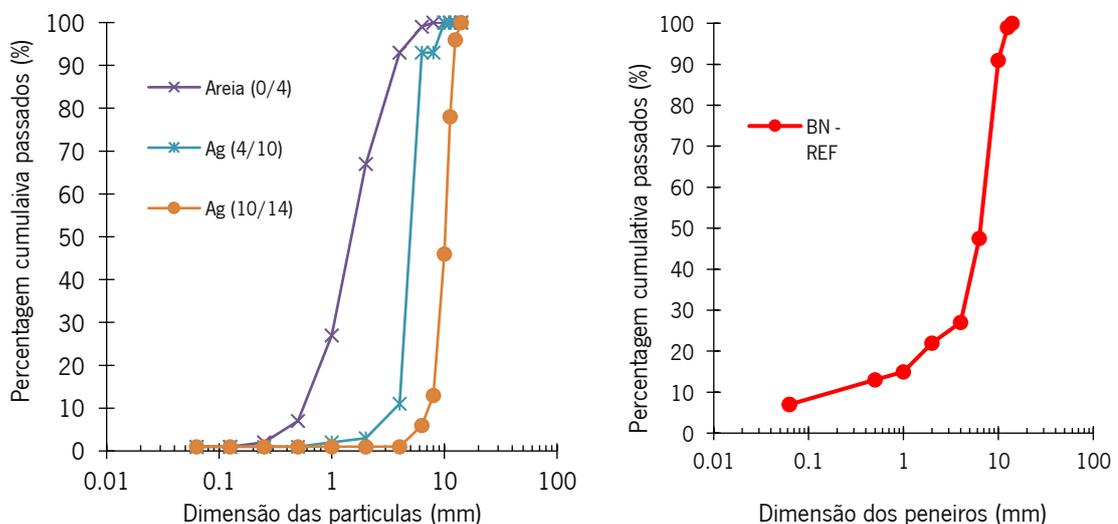


Figura 3. 1 A) Distribuição granulométrica dos três agregados naturais, B) BN-REF

Há materiais de construção que podem ser obtidos diretamente da natureza, como é o caso de agregados naturais, outros através da intervenção do homem.

Os materiais de construção devem satisfazer as condições de acordo com a função que desempenham. Devem ter facilidade de aplicação do material na obra; resistência ao tempo (durabilidade); preservação das condições de higiene como o isolamento do calor, do som e de infiltrações de água.

Alguns materiais constituem grande parte da composição das argamassas e dos betões. Têm menor custo e sua presença dá maior resistência ao desgaste. Esses materiais são classificados em naturais ou artificiais, miúdos ou graúdos e em leves ou pesados.

Na Tabela 3. 3 indica-se a densidade e a resistência à fragmentação dos agregados naturais utilizados neste trabalho.

Tabela 3. 3 Propriedade físicas dos agregados naturais

Propriedade	Unidade	Norma	Ag. 0/4	Ag. 4/10	Ag. 10/14
Densidade	kg/m ³	EN 1097-6:2016	2670	2660	2620
Determinação da resistência à fragmentação do agregado Naturais por Los Angeles	%	EN 1097-6:2011	-	20,64	23,17

3.2.3. Agregados reciclados

Tem sido desenvolvido um esforço para aumentar o conhecimento acerca dos agregados reciclados de modo a obter a forma mais adequada de os utilizar. A incorporação de materiais reciclados no betão tem sido uma via para atingir esse objetivo uma vez que toneladas de RCD são produzidas todos os anos.

Segundo Cabral [55], quando se compara os agregados reciclados com os de origem natural observa-se que a sua trabalhabilidade é afetada, o que pode ser explicado pelo facto de que os agregados reciclados serem mais porosos que os naturais, ocasionando uma maior absorção de água do que o normal. O resultado é um betão mais seco pelo facto de os agregados retirarem a água do processo que seria usado no cimento o que provoca uma menor trabalhabilidade do conjunto.

O mesmo autor destaca que um dos fatores que pode explicar essas características apresentadas nos materiais com agregado reciclado é o facto do processo de britagem poder causar a formação de agregados com extremidades angulares, fator que não é característico em materiais naturais que são arredondados e com uma superfície lisa.

A necessidade de reutilização desses resíduos acaba por ser extremamente importante tanto em termos ambientais em que se aliviam os impactos ocasionados ao meio ambiente, assim como em termos económicos. Neste estudo em que se analisa a viabilidade do reaproveitamento dos resíduos da construção e demolição, observa-se que há uma garantia em relação aos parâmetros de reutilização porque pode substituir os agregados naturais.

Neste trabalho foram utilizados agregados reciclados com as dimensões 10/14 e 4/10. Os agregados foram submetidos a uma caracterização física, realizando-se a granulometria dos agregados de modo a permitir o conhecimento da dimensão dos seus grãos

Na Figura 3. 2 apresenta-se a curva granulométrica utilizada para a produção dos betões com agregados reciclados.

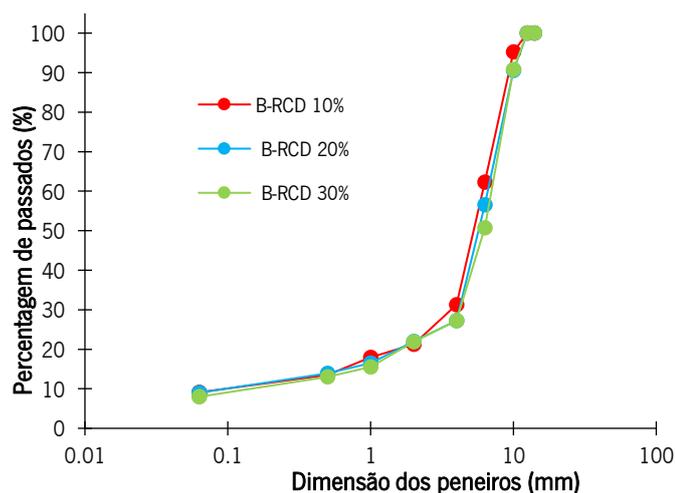


Figura 3. 2 Distribuição granulométrica dos betões com agregados reciclados.

3.2.4. Água

A utilização da água no betão tem as funções de ativar o ligante e de conferir a trabalhabilidade ao betão. Do ponto de vista do acionamento hidráulico do material aglutinante, a literatura, em geral afirma que uma percentagem de água de 23% do ligante é a necessária para ativá-lo sendo a quantidade remanescente destinada à trabalhabilidade.

Fator importante é a origem da água utilizada. A NP EN 1008 [56] rege a aplicação da água em betão e faz considerações quanto à procedência da água selecionada, tal que em síntese: água potável ou da rede satisfaz os requisitos normativos; água superficial natural subterrânea ou residual industrial pode ser apta, devendo ser submetida aos ensaios indicados na norma antes da sua utilização; água do mar ou água salobra são normalmente adequadas apenas para betão simples. No caso da necessidade de realização do ensaio de cloreto de sódio, é imprescindível aferir o teor de cloretos do líquido, principalmente quando se tratar de aplicação em betão armado.

A norma NP EN 1008 [56] apresenta a classificação dos tipos de água e a sua aptidão para o fabrico do betão. A água potável, ou a água da rede, é suposto satisfazer os requisitos desta norma, não sendo necessário realizar ensaios para avaliar a sua aptidão.

De acordo com o Caderno de Encargos da Estradas de Portugal [16] a água a empregar na execução de camadas não ligadas, de misturas betuminosas e de misturas tratadas com ligantes hidráulicos e betão hidráulico, deverá ser doce, limpa e não deverá conter óleos, ácidos, matérias orgânicas ou quaisquer outros produtos prejudiciais que possam influenciar os tempos de presa e o desenvolvimento da resistência da mistura.

3.3. COMPOSIÇÃO DOS BETÕES DRENANTES

De modo a produzir os betões drenantes a estudar neste trabalho foi utilizado o fuso granulométrico dos agregados proposto no Caderno de Encargos do Instituto das Estradas Portuguesas (IEP), para misturas betuminosas drenantes PA 12.5, o qual é apresentado na Figura 3. 3 A permeabilidade da mistura é conseguida pela não existência de elementos com dimensões entre 0.1 e 1 mm mas também com uma pequena percentagem de partículas entre 1 e 3 mm. Isto corresponde a ter elementos grossos os quais são ligados pelos de menor dimensão, faltando os elementos médios no esqueleto mineral, sendo por estes que se dará a percolação da água na mistura drenante.

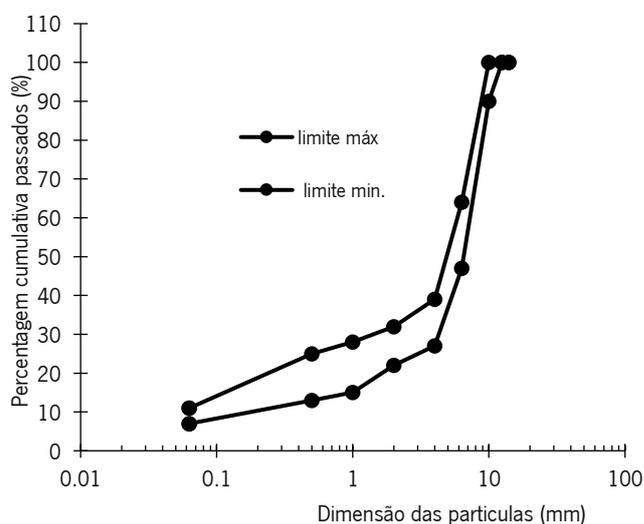


Figura 3. 3 Limite máximo, mínimo do fuso granulométrico do betão drenante PA 12.5

3.3.1. Betão com agregados naturais

Os agregados utilizados no fabrico dos betões drenantes são apresentados na Tabela 3. 4.

Tabela 3. 4 Características dos materiais para o betão drenante

Tipo dos materiais	Medidas	D max (mm)	Massa Volúmica (Kg/m³)
Cimento I	42,5	0,063	$\gamma_s = 3120$
Areia	0/4	4	$\gamma_s = 2660$
Agregado	4/10	10	$\gamma_s = 2620$
Agregado	10/14	14	$\gamma_s = 2630$
Agregado RCD	4/10	10	$\gamma_s = 2413$
Agregado RCD	10/14	14	$\gamma_s = 2408$
Água	Água natural	-	$\gamma_s = 1000$

O primeiro passo para a definição da composição dos betões foi o estabelecimento da mistura dos agregados a qual foi realizada definindo a percentagem de cada agregado de modo que a curva granulométrica da mistura dos agregados esteja dentro dos limites do fuso recomendado para as misturas betuminosas drenantes existentes no Caderno de Encargos da administração rodoviária (Tabela 3. 5).

Tabela 3. 5 Fuso granulométrico da mistura betuminosa PA 12,5 [16].

Medidas (mm)	Limite máx	Limite min.
14	100,00	100,00
10	100,00	90,00
4	39,00	27,00
2	32,00	22,00
1	28,00	15,00
0,063	11,00	7,00

Na Tabela 3.6 e Figura 3.4 apresentam-se os resultados da mistura dos agregados de modo a obter uma granulometria do betão que se enquadrasse no fuso especificado para as misturas betuminosas drenantes PA 12,5. De modo que se conseguisse uma maior porosidade do betão, decidiu-se fazer a mistura dos agregados de modo a acompanhar o limite inferior do fuso.

Tabela 3. 6 Fuso granulométrico da mistura betuminosa PA 12,5 e granulometria utilizada para o betão drenante

Medidas (mm)	Limite dos agregados de betão natural (BN) de PA 12,5%		
	limite máx	limite min.	BN - REF
14	100,00	100,00	100,00
10	100,00	90,00	91,00
4	39,00	27,00	27,00
2	32,00	22,00	22,00
1	28,00	15,00	15,00
0,063	11,00	7,00	7,00

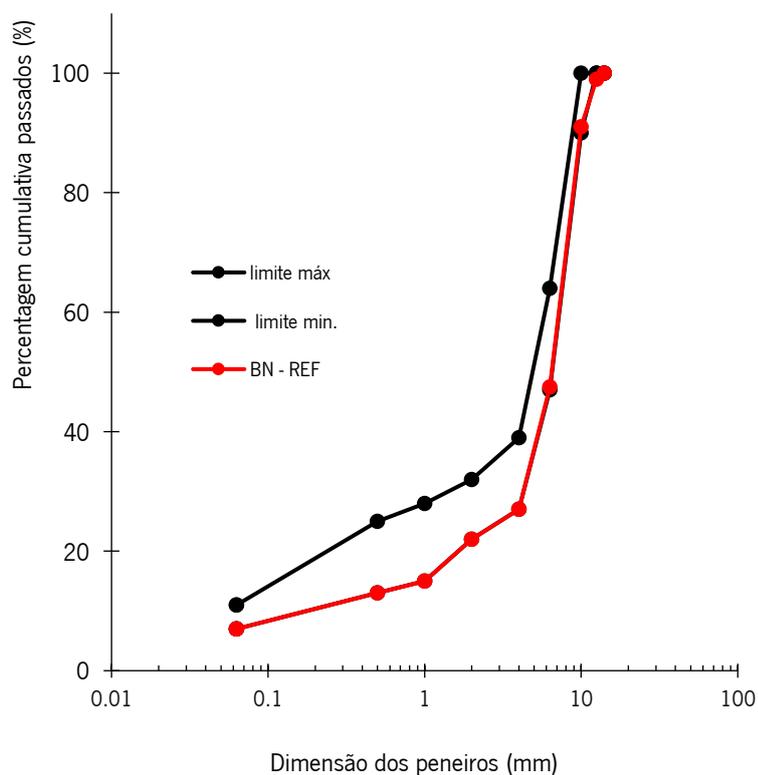


Figura 3. 4 Fusão granulométrica e granulometria utilizada para o betão drenante

Na Tabela 3.7 apresenta-se as composições dos betões com agregados naturais.

Tabela 3. 7 Composições dos betões com agregados naturais

Designação do Betão naturais (BN) e A/C	Vibração (s)	Água	Quantidade dos Materiais - (kg/m ³)			
			Cimento	Ag. 0/4	Ag. 4/10	Ag. 10/14
BN 0.30	20	90	300	73	1391	324
BN 0.30	40					
BN 0.30	60					
BN 0.35	20	122,5	350	69	1364	314
BN 0.35	40					
BN 0.35	60					
BN 0.40	20	160	400	65	1337	305
BN 0.40	40					
BN 0.40	60					

3.3.2. Betão com agregados naturais e a quantidade de cimento de 300 kg/m³

Na segunda fase do estudo as composições dos betões com agregados naturais de betão drenante, a ser utilizado para o estudo, são iguais às da Primeira fase. A diferença da composição é a quantidade do cimento de 300 kg/m³.

Tabela 3. 8 Composições dos betões com agregados naturais da segunda fase

Betões A/C	Vibração (s)	Cimento Kg/m ³	Quantidade dos materiais (kg/m ³)			
			Água	Agg. 0/4	Agg. 4/10	Agg. 10/14
B 0.30	20	300	90	37	1391	324
B 0.30	40					
B 0.30	60					
B 0.35	20	300	105	69	1364	314
B 0.35	40					
B 0.35	60					
B 0.40	20	300	120	65	1337	305
B 0.40	40					
B 0.40	60					

3.3.3. Betão com agregados reciclados

Foram produzidos três betões drenantes com agregados reciclados com uma composição de 300 kg/m³ de cimento e uma relação água/cimento de 0,30, tendo-se adotado um tempo de vibração de 40 segundos. Estes betões com agregados reciclados foram produzidos com 10%, 20%, e 30% de agregados reciclados com dimensões de 4/10 e 10/14 de acordo com a composição granulométrica indicada na Tabela 3. 9 e Figura 3.5.

Tabela 3. 9 Composição granulométrica dos betões com agregados reciclados

Abertura peneiro (mm)	limite máx	limite min.	Passados			
			BN - REF	10% RCD	20% RCD	30% RCD
14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
10	100,00	90,00	91,00	95,27	90,54	90,81
4	39,00	27,00	27,00	31,30	27,24	27,21
2	32,00	22,00	22,00	21,27	22,00	21,94
1	28,00	15,00	15,00	17,96	16,50	15,49
0,063	11,00	7,00	7,00	9,10	9,00	7,98

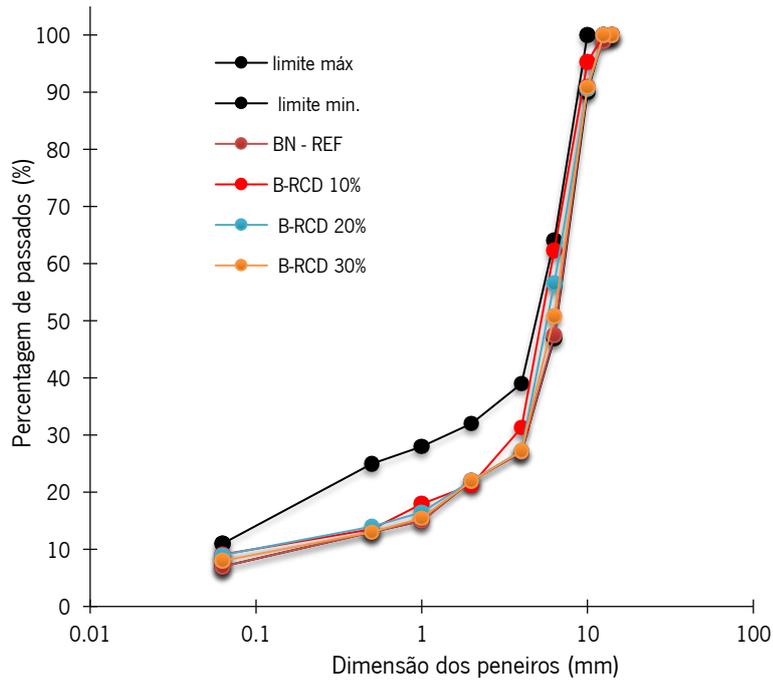


Figura 3. 5 Fusos granulométricos do betão de BN-REF e B-RCD

A composição dos três betões com agregados reciclados encontra-se na Tabela 3. 10, conjuntamente com a formulação do betão com agregados naturais utilizado como referência ao qual é atribuída a designação de REF. Os betões com agregados reciclados foram produzidos com um tempo de vibração de 40 segundos.

Tabela 3. 10 Composições dos betões com agregados reciclados

Designação dos betões	Quantidade dos materiais (kg/m ³)					
	CEM I 42,5	Água	Ag. 0/4	Ag. 4/10	Ag. 10/14	RCD 4/14
BN - REF			73	1391	324	0
B-RCD 10%	300	90,0	220,9	1091,1	160,5	184
B-RCD 20%			220,6	929,6	136,8	368
B-RCD 30%			220,4	769	112,9	551

Nas Tabelas 4.10 e 4.11 e Figuras de 3.6 e 3.7 encontram-se os resultados do fuso granulométrico de acordo com a norma ASTM C33 com requisitos de classificação para agregados grossos do tamanho de N8 e N89. As duas granulometrias ASTM em comparação com os fusos da granulométrica de PA 12,5 de BN-REF e B-RCD são próximos dos fusos de ASTM C33 do tamanho de N8 [88] e N89 [89].

Tabela 3. 11 ASTM C33 - Requisitos de classificação para agregados grossos - Tamanho N8 [57]

Medidas (mm)	Limite inferior	Limite superior	Betões
	% Passados		
16,00	100,00	100,00	100,00
14,00	100,00	100,00	85,80
12,50	100,00	100,00	85,81
9,50	85,00	100,00	85,81
4,75	10,00	30,00	21,21
2,36	0,00	10,00	17,94
1,18	0,00	5,00	13,49
0,30	0,00	0,00	10,00

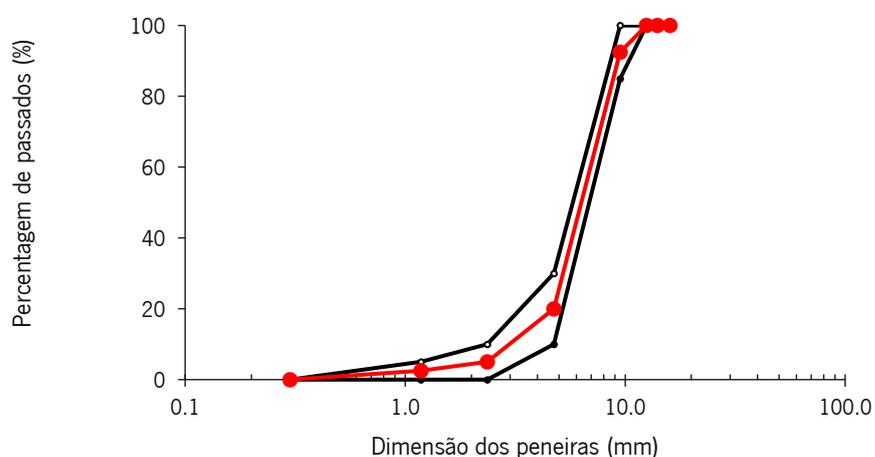


Figura 3. 6 Fusos granulométricos do Tamanho N8 [57]

Tabela 3. 12 ASTM C33 Requisitos de classificação para agregados grossos - Tamanho N89 [58]

Medidas (mm)	Limite inferior	Limite superior	Betões
	% Passados		
16,00	100,00	100,00	100,00
14,00	100,00	100,00	85,80
12,50	100,00	100,00	85,81
9,50	90,00	100,00	85,81
4,75	20,00	55,00	21,21
2,36	5,00	30,00	17,94
1,18	0,00	10,00	13,49
0,30	0,00	5,00	10,00

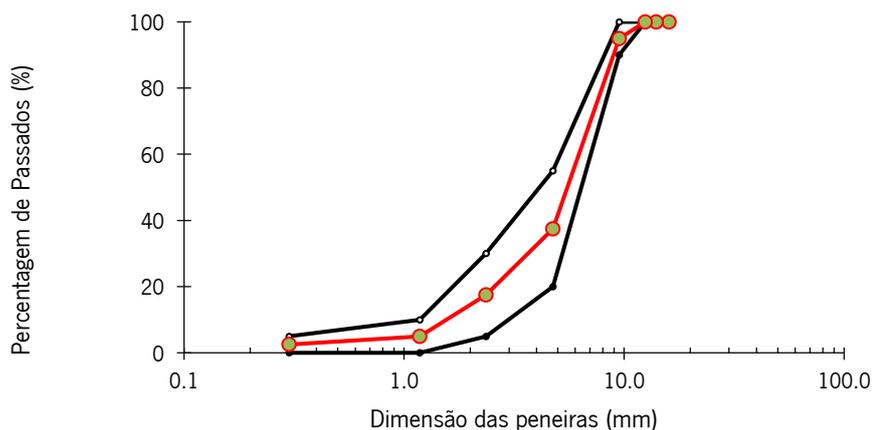


Figura 3. 7 Fusos granulométricos Tamanho N89 [58]

3.4. ENSAIOS AOS BETÕES FRESCOS

Nesta secção são descritos todas os ensaios realizados para caracterização dos betões frescos produzidos com agregados naturais e com agregados reciclados, salientando-se essencialmente a produção dos provetes e os seus requisitos segundo a normalização.

Normalmente, para os ensaios do betão normal ou convencionais utilizam-se os ensaios de abaixamento, peso específico e determinação do teor de ar.

Para a realização dos ensaios de caracterização do betão fresco e endurecidos foram utilizados diferentes tipos de equipamentos e provetes (Figura 3. 8), os quais foram escolhidos de acordo com a normalização dos betões.

Os provetes A com $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ foram utilizados nos ensaios de absorção por capilaridade e por imersão.

Os provetes B com $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ foram utilizados nos ensaios de resistência à compressão, permeabilidade K_{LCS} e para avaliação da textura. Os cilíndricos de diâmetro 100 mm e 300 mm de altura foram utilizados nos ensaios da resistência à tração, permeabilidade do K_{FH} e cortes para o ensaio da resistência por cântabro, e as vigas com $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$ foram utilizadas nos ensaios de resistência à flexão e ensaio de sulfato de magnésio.

Os provetes com marcação C foram preparados para os ensaios de Pendulo britânico, textura, mancha de areia, e cortes para os ensaios de fadiga, módulo de elasticidade, módulo complexo, gelo-degelo. O provete A parte D é a laje de referência e o provete E é uma viga para o ensaio de fadiga.



Figura 3. 8 Provetes produzidos para aos ensaios

3.4.1. Ensaio de abaixamento

No estudo da reologia dos betões optou-se por efetuar ensaios convencionais, nomeadamente o ensaio do cone de Abrams (designado também por “Slump Test”). O “ensaio de abaixamento” foi realizado com base na norma NP EN 12350-2:2009 [59] consistindo no preenchimento de um molde com betão em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde, compactando cada camada com 25 pancadas através de um varão de compactação. No final do preenchimento retira-se o molde e verifica-se o abaixamento do betão entre as diferenças de altura com o topo do molde e abaixamento do betão.

3.4.2. Ensaio de vêbê

O principal objetivo do vêbê teste é determinar a trabalhabilidade do betão acabado de produzir. O vêbê teste dá uma indicação sobre a mobilidade e o aspeto de compactação do betão recém-misturado. O vêbê teste realiza a medição do esforço relativo para alterar a massa do betão de uma forma definida para outra.

O ensaio do “vêbê” foi realizado segundo a norma NP EN 12350-3 [60]. O “vêbê teste” é determinado em segundos desde o início do preenchimento do disco até ao seu preenchimento total.

O molde de compactação utilizado no ensaio de vêbê tem um diâmetro de base superior de 100 ± 2 mm, um diâmetro de base inferior de 200 ± 2 mm e altura de 300 ± 2 mm. O molde é firmemente preso à mesa vibratória e em seguida humedecido. Segue-se a montagem da tremonha. O molde é preenchido em três camadas, cada uma com aproximadamente $1/3$ da altura, cada uma compactada com 25 barras perfurantes distribuídas uniformemente em toda a seção transversal.

O vêbê teste permite definir a trabalhabilidade do betão de acordo com os valores indicados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 Classe de trabalhabilidade do betão fresco função ensaio de vêbê [60]

Descrição da trabalhabilidade	Medição de trabalhabilidade		Tempo vêbê (segundos)
	Abaixamento (mm)	Fator de compactação	
Extremamente seco	-	-	32 - 18
Muito rígido	-	0,70	18 - 10
Rígido	0 - 25	0,75	10 - 5
Plástico rígido	25 - 50	0,85	5 - 3
Plástico	75 - 100	0,90	3 - 0
Fluido	150 - 175	0,95	-

3.4.3. Ensaio de espalhamento

Os betões estudados neste trabalho foram produzidos numa betoneira de eixo vertical, com uma capacidade 90 litros. Após a realização da amassadura e antes de encher os moldes, foi efetuado o ensaio de espalhamento segundo a norma NP EN 12350-2:2009 [59] com a mesa de espalhamento.

O princípio deste ensaio permite determinar a consistência do betão fresco através do espalhamento do betão numa mesa plana sujeita a pancadas. O betão é colocado no molde no centro da mesa em duas camadas apiloadas (10 pancadas). É retirado o molde e levantada a placa superior através da pega todos os 2 a 5 s, 15 vezes. É medido com régua o diâmetro do espalhamento em duas direções paralelas aos lados da mesa. O valor obtido corresponde ao diâmetro de dois lados espalhamento a dividir por dois para tirar a média.

3.4.4. Ensaio de massa volúmica e determinação do teor de ar do betão fresco

A massa volúmica do betão fresco é determinada dentro de um recipiente rígido e estanque, de volume e massa conhecidos.

Este método consiste em introduzir água num recipiente estanque a uma altura pré-definida sobre a amostra de betão compactado de volume conhecido, aplicando-se sobre a água uma pressão de ar pré-definida. Mede-se a redução do volume do ar na amostra de betão através da observação do abaixamento do nível da água, cuja coluna está calibrada em termos de percentagem de ar na amostra de betão.

Caraterizou-se os betões no estado não endurecido, relacionando a densidade segundo a norma NP EN 12350-6 [61] com a percentagem da determinação do teor de ar NP EN 12350-7 [62].

Na realização destes betões preencheu-se um recipiente com betão drenante a ensaiar. De seguida procedeu-se à vibração e rasou-se o betão em excesso, pesando-se a massa (m_1). Com a massa (m_1) e o volume do recipiente determinou-se a densidade do betão fresco de cada mistura.

A porosidade do betão drenante de continuidades ou descontinuidades representa os vazios existentes no meio contínuo formado pelos minerais constituintes da matriz dos agregados grossos e finos. A presença dos poros e o desenvolvimento destes vazios estão estreitamente relacionados com os vazios dos agregados grossos. A quantidade de vazios é avaliada pela porosidade (n) que é a razão entre o volume de vazios de uma amostra de betão drenante e o seu volume total, de acordo com Equação 2.

$$n = \frac{np}{vt} \quad (2)$$

Em que:

np = Volume dos vazios do betão drenante;

n = Porosidade do provete;

Vt = Volume do provete.

A porosidade dos betões drenantes é normalmente expressa em percentagem considerando-se 10% como um valor médio, 5% um valor baixo e 15% um valor alto. Os vazios são constituídos pelos poros e fissuras do betão drenante e estão necessariamente todos interligados. A porosidade total (n) resulta assim da porosidade correspondente aos poros (np) e do volume do provete (vt). O mesmo recipiente com o betão drenante fresco foi utilizado para a determinação da percentagem de ar.

3.5. ENSAIOS AOS BETÕES ENDURECIDOS

De todas as propriedades atribuídas ao betão no estado endurecido, a resistência à compressão é, regra geral, a mais importante. Contudo, também a resistência à tração, à flexão, bem como o módulo de elasticidade, fadiga, são propriedades importantes para fazer uma caracterização mecânica mais completa do betão. Em relação ao betão drenante a permeabilidade é uns dos ensaios importantíssimos. A determinação da permeabilidade foi realizada recorrendo a dois ensaios, nomeadamente utilizando os ensaios de permeabilidade permeâmetro KLCS do (Coeficiente Laboratório de Caminhos de Santander) e permeabilidade de permeâmetro K_{FH} (coeficiente Falling Head).

Com o Permeâmetro determinou-se o Coeficiente Laboratório de Caminhos de Santander KLCS e com o Falling Head determinou-se o coeficiente "Falling Head (K_{FH})".

Antes de submetidos aos ensaios, todos os provetes foram submetidos à sua saturação numa câmara de cura de acordo com a norma NP EN 12390-2 [63], de modo a preencher os requisitos normativos.

3.5.1. Ensaios de permeabilidade com permeâmetro LCS

Os valores da permeabilidade à água, medida com o permeâmetro KLCS deverão estar compreendidos entre 10 e 30 segundos. Caso se verifique que ambas as percentagens de agregado utilizadas verificam as especificações definidas em 14.03.2.4 para a mistura em causa base nas normas de NLT- 327 [64] e pr EN 12697 – 40 [65].

Para além dos procedimentos referidos em rubrica 15.03.2.2-3, dever-se-á ter em conta o seguinte; aplica-se três misturas de betão com percentagem de agregado fino de 0/4 mm e grosso de 4/10, 10/14 e a quantidade do cimento diferentes e vibração de 20 40 e 60 segundos:

O ensaio, iniciou-se com A/C de 0,30 e cimento de 300 kg/m³ e a vibração de 20, 40 e 60 s.

Os ensaios seguintes com A/C de 0,35 e quantidade do cimento 350 kg/m³ e as vibrações.

Os últimos ensaios com 0,40 e a quantidade de 400 kg/m³ e as vibrações.

A Figura 3. 9 apresenta o permeâmetro KLCS utilizado nos ensaios de permeabilidades.

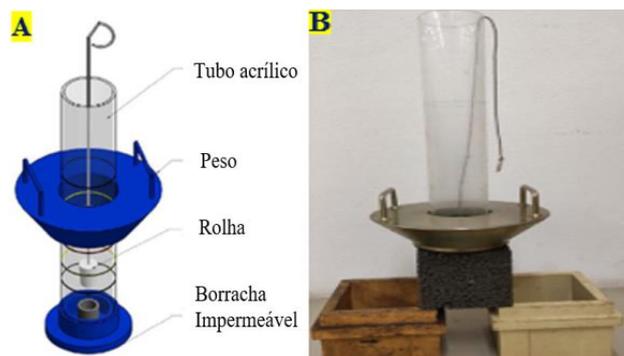


Figura 3. 9 Permeâmetro K_{LCS} utilizado nos ensaios de permeabilidade [64]

O ensaio foi realizado com um permeâmetro de carga variável, determinando-se o tempo que demora um determinado volume de água a escoar num orifício de 3 cm de diâmetro. O orifício provoca a perda de carga resultando num caudal escoado, traduzindo-se num coeficiente de permeabilidade K_{LCS} (10² cm/s). O coeficiente K_{LCS} é calculado em função do tempo de escoamento (T) em segundos, utilizando-se a Equação 3.

$$\ln K_{LCS} = 7.624 - 1.348 \ln T \quad (3)$$

A Equação 3 permite caracterizar a permeabilidade do betão drenante e verificar se os coeficientes calculados se encontram dentro dos requisitos estabelecidos para os pavimentos drenantes.

De acordo com o Caderno de Encargos Tipo das Estradas de Portugal, S.A. [66], a permeabilidade medida com o permeâmetro K_{LCS} deve estar no intervalo de 10-30 segundos, correspondendo a um coeficiente k de permeabilidade a 91,85 - 20,89 10² cm/s.

Para o cálculo da permeabilidade, utilizando o permeâmetro LCS, foram utilizados provetes de forma cúbica com a dimensão de 150x150x150 mm³, tendo-se realizado vinte e sete ensaios, correspondentes aos três tipos de betão e três tempo de vibração.

3.5.2. Ensaio de permeabilidade com permeâmetro Falling Head

A permeabilidade dos betões drenantes também foi caracterizada e avaliada pelo coeficiente de permeabilidade K_{FH}. Para tal, fez-se fluir uma quantidade de água sob um gradiente hidráulico unitário através de uma área unitária por unidade de tempo, obtendo-se a permeabilidade através da medição de seu coeficiente K_{FH}.

O equipamento do coeficiente Falling Head já utilizado por diversos autores, nomeadamente Neithalath [9], foi utilizado no estudo para caracterizarmos os betões drenantes, como indica na Figura 3. 10 A) e utilizado de acordo com a norma ACI 522R-10 [67].

No estudo do coeficiente k_{FH} da permeabilidade no equipamento “Falling head”, realizou-se no total três cilindros por betão e tempo de vibração, sendo no total nove cilindros por betão, perfazendo no estudo vinte e sete cilindros, sendo a dimensão de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Para a realização do ensaio usou-se amostras cilíndricas com uma área de seção transversal A_c (mm^2). O provete é fixado num tubo graduado de área de seção transversal A_p (mm^2) que se encontra no topo do equipamento. Para garantir que não havia fugas pelo lado transversal, os provetes foram selados dentro de uma manga extensível e acoplada num tubo fechado de plástico, de modo que não ocorresse nenhuma fuga de água enquanto fluía axialmente através da amostra.

A água percorre uma distância L (mm) no betão drenante num determinado espaço de tempo t (s). É colocada a água numa determinada altura h_0 (mm). Após abrir a válvula inicia-se a medição do tempo, deixando escoar a água até à marca h_1 (mm), fixando o valor do tempo do escoamento. O coeficiente de permeabilidade, k , foi calculado de acordo com a lei da equação de Darcy [68].

$$K = \frac{A_p \times L}{A_c \times t} \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \quad (4)$$

Onde: K = Coeficiente Falling head (mm/s),

A_p = Diâmetro interno do tubo (mm),

A_c = Diâmetro do betão (mm),

L = Distância de escoamento (mm),

h_0 = altura da água no tubo (mm),

h_1 = descidos até atingir um ponto pré-determinado (mm),

t = tempo de escoamento da água (s).

As permeabilidades dos betões drenantes foram caracterizadas e avaliadas pelo coeficiente de permeabilidade do permeâmetro K_{FH} . Para tal, fez-se fluir uma quantidade de água sob um gradiente hidráulico unitário através de uma área unitária por unidade de tempo, obtendo-se a permeabilidade através da medição de seu coeficiente K_{FH} .

O equipamento do coeficiente Falling Head Figura 3. 10 B) foi utilizado para caracterizar o betão drenante de acordo com a norma ACI 522R-10 [67].

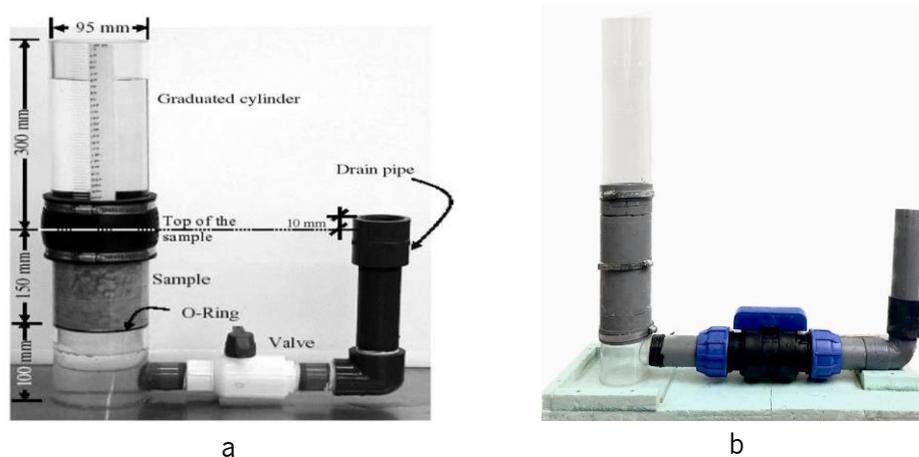


Figura 3. 10 Ilustração (A) [67] e equipamento de ensaio (B)

3.5.3. Ensaio de absorção por imersão

Uma outra forma de absorção de água no betão deriva da sua imersão, a qual tem influência diretamente na sua durabilidade. O ensaio em causa permite a quantificação do volume de vazios acessíveis na massa de betão quando submetido a este ensaio. A metodologia deste ensaio laboratorial seguiu a especificação do LNEC E-394 – 1993 [69].

Na realização do ensaio foi necessário recorrer ao equipamento indicado na Figura 3.11, onde também se observa os provetes utilizados e a estufa ventilada. A geometria dos provetes escolhidos para analisar a absorção de água por imersão no betão produzido foi o cubo com a dimensão de 100x100x100 mm³ com 28 dias de cura [69]. O procedimento de ensaio seguiu a norma NP 581-1969 [70].



Figura 3.11 Provetes e equipamentos de ensaios de absorção de água por imersão [69] [70]

Neste estudo optou-se por fazer uma análise da imersão de porosidade dos diferentes betões drenantes. Foram usados os provetes de 100x100x100 mm³ para os ensaios da porosidade por imersão para efetuar a análise, seguindo uma metodologia de trabalho e foram submetidos à sua saturação em água de acordo com a norma NP EN 12390-7 [71].

Foi possível analisar os resultados obtidos da absorção de água por imersão dos provetes do betão determinados a partir da seguinte expressão:

$$A_i (\%) = \frac{M_1 - M_3}{M_1 - M_2} \times 100 \quad (5)$$

As variáveis representam:

A -Absorção de água por imersão (%);

M1 -massa do provete saturado com superfície seca (g);

M2 -massa hidrostática do provete saturado (g);

M3 -massa do provete seco em estufa (g).

Após o processo de saturação dos provetes, contabilizando as massas, correspondendo a quantidade de água colocada à quantidade de poros para esse provete, convertendo estas medidas em percentagem de poros, dos provetes com partículas. O objetivo do ensaio mostra o método da determinação dos resultados da massa volúmica aparente e o volume vazio do betão endurecido baseado a NP 581-1969 [70].

3.5.4. Ensaio de determinação da absorção da água por capilaridade

A determinação da absorção da água por capilaridade dos betões drenantes efetuou-se de acordo com NP EN 772 – 11 (IPQ, 2002) [72].

O objetivo e o campo de trabalho especificam o método de determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade para betão drenante e a taxa de absorção inicial.

Foram utilizados dois provetes de cada betão, do de referência e com agregados reciclados, com as dimensões de 100 x 100 x 100 mm³, totalizando 8 provetes (Figura 3. 12).

O procedimento de ensaio consistiu em secar os provetes de ensaio até massa constante numa estufa ventilada a uma temperatura de 70 °C ± 5 °C. A massa constante atingiu-se quando a perda de massa entre as duas determinações não excedeu 0,1 % da massa total em duas pesagens consecutivas durante 9 dias.

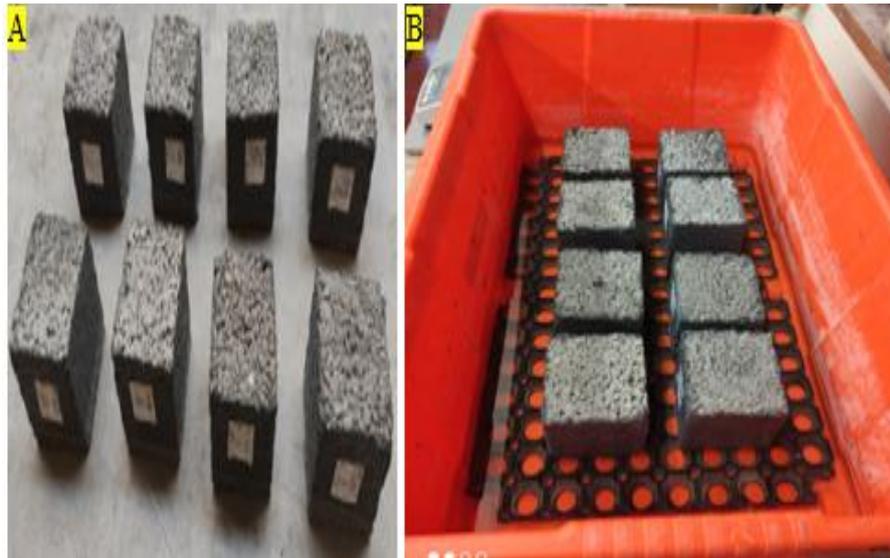


Figura 3. 12 Provetes e recipiente do ensaio de capilaridade

3.5.5. Avaliação da porosidade através de imagem

Neste estudo realizou-se também uma análise 2D da porosidade dos diferentes betões drenantes. Foram usados os provetes dos ensaios de porosidade por imersão para efetuar esta análise.

Os provetes foram preenchidos com uma calda de cimento bastante fluida, garantido o preenchimento dos poros. Cada provete foi posteriormente dividido em fatias com uma espessura de 25 mm, num total 4 fatias do mesmo provete de $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ para a análise da porosidade através de imagem. A porosidade foi assumida pela subtração entre o branco com o preto das imagens a Preto e Branco das fatias dos provetes.

O método abrange determinadas fases de processamento de imagem. A primeira fase inclui tirar uma fotografia com uma escala conhecida, na qual será utilizado no software de imagem para relacionar as dimensões dos poros e quantificar percentualmente a quantidade. A segunda fase compreende em passar essa imagem para 8 bits, apenas duas cores, branco e preto, permitindo ao software reconhecer o que são poros e agregados, tornando-se um processo de identificação e de cálculo mais simples (Figura 3. 13ABC). Este processo permite uma digitalização das imagens para produzir uma distribuição vertical da porosidade.

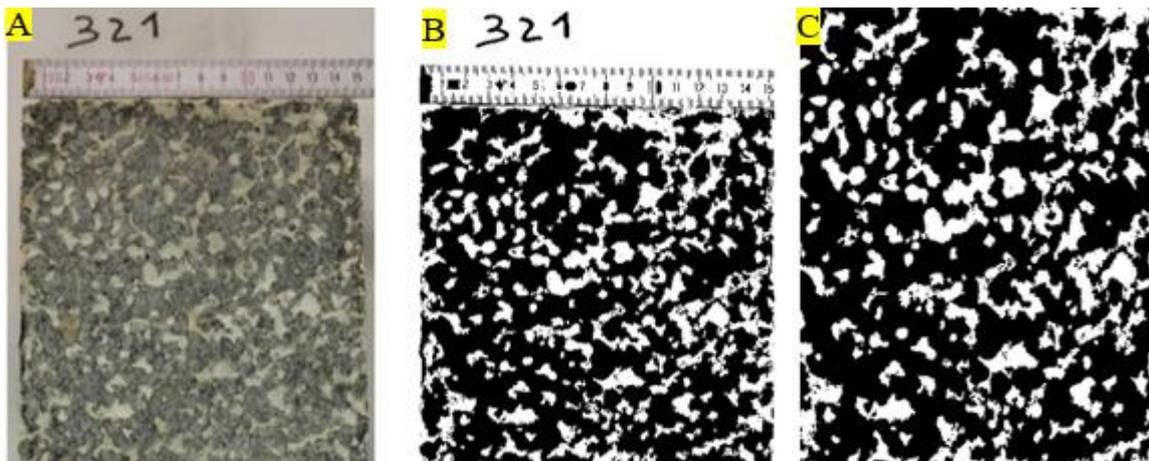


Figura 3. 13 Fases para a determinação da porosidade através de imagem

3.5.6. Ensaio de resistência à compressão

Na determinação da tensão de rotura à compressão do betão foi utilizado um equipamento hidráulico. A prensa hidráulica tem capacidade de aplicação de forças gradualmente crescentes, de forma contínua e sem choques. No caso deste ensaio foi aplicada uma velocidade de 13,5 kN/s de acordo com a dimensão do provete de 150x150x150 mm³ e perpendicularmente às faces do provete. A resistência à compressão é calculada com base na Expressão 6 em que F_c é a resistência à compressão, F é a carga máxima à rotura e A_c é a área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada baseando a norma NP EN 12390-3 [73].

$$F_c = \frac{F}{A_c} \quad (6)$$

A resistência à compressão deve ser expressa com aproximação aos 0,5 MPa. A amostra total de caracterização do betão produzido em laboratório foi constituída por 6 provetes, 2 provetes de cada série e a sua avaliação foi realizada aos 7, 14 e 28 dias para todas as composições estudadas. Neste ensaio foi utilizado o equipamento da Figura 3. 14.



Figura 3. 14 Máquina da Resistência à Compressão (A), e balança (B)

3.5.7. Ensaio de resistência à tração

Na determinação da tensão de rotura à tração por compressão diametral do betão foi utilizado um equipamento hidráulico de compressão (Figura 3. 15). O ensaio foi realizado a uma velocidade de 1,5 kN/s de acordo com a dimensão do provete de cilindro de diâmetro Ø 100 mm e altura de 90 mm. Os provetes são cilíndricos em conformidade com a norma EN 12390-6 [74].

A velocidade constante de aplicação da carga dentro do intervalo de 0,04 MPa por segundo (N/mm² x s) a 0,06 MPa por segundos (N/mm² x s) é dada pela fórmula seguinte:

$$R = \frac{s \times \pi}{2 \times L \times d} \quad (7)$$

Onde:

- R = velocidade de aplicação da carga, em newtons por segundos
- L = comprimento do provete, em milímetros
- d = dimensão designada do provete, em milímetros
- s = velocidade de aplicação da tensão, em Mega pascais por segundo ou newtons por milímetro quadrado por segundo.



Figura 3. 15 Ensaio de resistência à tração

3.5.8. Ensaio da resistência à flexão

Os provetes de ensaio devem ser prismas com 100 x 100 x 400 mm³ conforme com a EN 12390-5 [75]. Os provetes devem estar conservados numa câmara de cura e o excesso de humidade da superfície dos provetes deve ser removido antes de serem colocados na máquina. O provete de ensaio deve ser colocado na máquina corretamente centrado e com o eixo longitudinal dos provetes perpendicular ao eixo longitudinal dos roletes superior e inferior.

Deve-se controlar que todos os roletes estão em contacto efetivo com o provete e a aplicação da carga de tensão, sem choques, deve ter uma velocidade de 0,04 – 0,06 MPa/s (N/mm².s) até a rotura do provete (Figura 3. 16). Nesta figura é possível observar o rolete central superior e os dois roletes de apoio inferiores.

A resistência à flexão é dada pela equação seguinte:

$$f_{ef} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2d_1 \cdot d_2^2} \quad (8)$$

f_{ef} = resistência à flexão

F = carga máxima

l = distância entre os roletes inferiores de apoio

d1 = largura do provete.

d2 = altura do provete.



Figura 3. 16 Máquina do ensaio de resistência à flexão

3.5.9. Ensaio de módulo de elasticidade em compressão

O módulo de elasticidade do betão, E_c , é necessário como valor de referência e deve ser determinado em pelo menos três provetes com as mesmas dimensões daqueles que são utilizados para a determinação do módulo de elasticidade LNEC E.397-1993 [76]. Foram utilizados provetes com a dimensão de 50 x 50 x 100 mm³.

O módulo de elasticidade em compressão E_c , é definido pela expressão:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{(\varepsilon_{a,n} - \varepsilon_{b,n})} \times 10^{-3} \quad (9)$$

Sendo:

σ_a = tensão máxima aplicada

σ_b = tensão inicial

$\varepsilon_{a,n}$ = extensão para a tensão σ_a medida no n-ésimo ciclo de carga

$\varepsilon_{b,n}$ = extensão para a tensão σ_b medida no início do ciclo de carga.

Para assegurar que as várias medições do módulo de elasticidade dinâmico executadas antes e após os ensaios de ciclos de gelo/degelo são feitos nos mesmos locais dos provetes, deve colocar-se marcas indeléveis, sob a forma de pontos, nas faces apropriadas dos provetes.



Figura 3. 17 Ensaio de módulo de elasticidade

3.5.10. Ensaio da resistência ao desgaste

O objetivo do ensaio de resistência ao desgaste é determinar a perda de coesão que é produzida pela ação da água sobre betões drenantes, para uso na construção de estradas.

No início do ensaio colocam-se os provetes no tambor da máquina de Los Angeles, sem esferas. O tempo que o tambor deverá rodar está normalizado. A máquina roda 300 voltas, a uma velocidade constante de 30 a 33 rpm conforme a Norma NP EN 1097-2 [77].

Em Espanha o método de formulação das misturas betuminosas utiliza o ensaio de Cântabro desenvolvido com a finalidade de avaliar a perda por desgaste da camada de desgaste. Este ensaio consiste na determinação da perda de massa por desgaste, de provetes do betão drenante do tipo cilindro (Ø100 mm e altura de 63 mm), submetidos a 300 ciclos na máquina de desgaste de Los Angeles, sem esferas (Figura 3. 18 A).

Após as 300 rotações os provetes são pesados, sendo possível calcular a perda de peso dos mesmos. Este ensaio permite também avaliar indiretamente a coesão, assim como a resistência à desagregação da mistura perante a sucção e os efeitos abrasivos originados pelo tráfego.

O ensaio consiste em moldar 6 provetes, dos quais 3 são colocados numa camara húmida (CH) a 25°C durante 672 horas e os restantes são inicialmente imersos em água a 25°C, onde ficam durante 28 dias e depois são retirados da água e mantidos num ambiente livre a 25°C, durante 24 horas. Após este tempo os provetes são medidos e pesados [77].

No final do ensaio, o provete é limpo com compressor (Figura 3. 18B). De seguida, pesa-se o provete e calcula-se o coeficiente de Los Angeles (LA) [77], a partir da equação 10:

$$P(\%) = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (10)$$

Onde: P% = Percentagem do desgaste do provete.

P1 = Massa inicial do provete (gramas)

P2 = Massa final do provete (g).



Figura 3. 18 Máquina de Los Angeles (A) [77] e os provetes ensaiados (B)

3.5.11. Ensaio da perda de massa por imersão do sulfato magnésio

Este ensaio tem por objetivo avaliar o comportamento dos betões drenantes quando submetidos à ação cíclica constituída por imersão em sulfato de magnésio. Os provetes são submetidos a ciclos de imersão numa solução saturada de sulfato magnésio seguida de secagem em estufa a (110 ± 5) °C. Deste modo, os provetes são submetidos aos efeitos destrutivos da cristalização e reidratação repetidas do sulfato de magnésio nos poros do betão drenante.

Os ensaios foram efetuados de acordo com a norma NP EN 1367-2 2002 [78] e submetidos a 25 ciclos de imersão numa solução saturada de sulfato de magnésio, seguidos da secagem em estufa. Deste modo, ficando sujeitos aos efeitos destrutivos da cristalização e reidratação repetida do sulfato magnésio nos poros do betão. A degradação provocada pelos efeitos destrutivos é medida pela quantidade de grãos de dimensão reduzidas que é produzida. A avaliação do comportamento dos provetes quando submetidos à ação cíclica constituída por imersão em sulfato magnésio durante 24 horas é realizada após lavagem dos provetes durante 2 horas e secagem na estufa (24 h). As amostras a utilizar para o ensaio têm $50 \times 50 \times 100$ mm³ (Figura 3. 19A).

A solução é obtida pela dissolução de 5 g de cloreto de bário em 100 ml de água destilada ou desmineralizada ou preparar a solução juntando lentamente 1500 g de sal cristalino a cada litro de água. A temperatura da solução deve ser mantida entre 25°C e 30°C e deve-se misturar vigorosamente durante a adição dos cristais de sal. Durante o ensaio deve-se baixar a temperatura para (20 ± 2) °C e manter esta temperatura durante (48 ± 1) h.

Cada provete deve ser suspenso num recipiente contendo a solução saturada de sulfato magnésio, de modo que a parte superior dos provetes fique submersa a uma profundidade de 20 mm durante um período de $(17 \pm 0,5)$ h, mantendo um espaço mínimo de 20 mm entre cada provete e as paredes.

Em seguida os provetes devem ser retirados da solução, escorridos durante $(2 \pm 0,25)$ h e voltar a tapar imediatamente o recipiente. Secar cada provete na estufa (110 ± 5) °C e deixá-lo arrefecer durante $(5 \pm 0,25)$ h até à temperatura do laboratório. Antes da imersão seguinte, destruir as acumulações de sal que se tenham depositado no fundo do recipiente misturar bem a solução e deixá-la repousar durante 30 minutos. Verificar se a massa volúmica da solução no recipiente atingiu uma massa volúmica de $(1292 \pm 0,008)$ g/ml, decantando uma parte da solução num frasco, medindo a massa volúmica com o densímetro e voltando a introduzir a solução no recipiente.



Figura 3. 19 Provete no início (A), e recipiente com provete imerso no sulfato magnésio (B)

3.5.12. Ensaio de gelo/degelo

O objetivo deste ensaio é a avaliação dos efeitos de ciclos de gelo degelo no betão. A norma contém disposições quer para um ensaio tecnológico reduzido (ensaio A) para avaliação dos efeitos de ciclos de gelo degelo em características de desempenho relevantes, quer para um ensaio de identificação (ensaio B).

Utilizou-se os provetes prismáticos com 50x50x100 mm³, de forma a avaliar o efeito da ação do gelo-degelo e o módulo de elasticidade dos betões.

A análise da durabilidade dos betões foi baseada no procedimento da ASTM C666:97 [79], tendo sido monitorizadas as variações de comportamento e do módulo de elasticidade dinâmico, ao longo de vários ciclos de gelo-degelo. Os provetes foram imersos em água durante o tempo gelo/degelo.

São utilizados 9 provetes, que sejam considerados representativos da perda de massa a ser estudada. Um dos provetes de cada grupo é utilizado para monitorizar a temperatura no seu interior e outros aparelhos de controlo da temperatura interior da câmara e ambiente laboratorial. Este ensaio tem duas bombas de água para encher e despejar a água no recipiente onde coloca os provetes no interior da camara de gelo/degelo com um aquecedor e uma bomba de circulação da água (Figura 3. 20).

O procedimento de um ciclo são 24 horas. Os provetes são secos em estufa à temperatura de (110 ± 5) °C até 24 ± 2 h depois de 5 ciclos e deixa-se arrefecer em ambiente laboratorial até 2 h. De seguida os provetes são monitorizados até degradação significativa.



Figura 3. 20 Equipamentos (A) e colocação dos provetes de gelo degelo (B)

3.5.13. Ensaio de medição da textura

Neste ensaio é realizada uma análise das características superficiais dos betões. Esta análise é essencial para a compreensão do modo de produção dos betões que permita um desempenho funcional adequado, quando aplicados em camada de desgaste, principalmente em termos de aderência e atrito.

O método utilizado nesta fase do trabalho consistiu na caracterização da macrotextura da superfície do betão tendo sido realizada através do método volumétrico da mancha de areia e por levantamento a laser.

O objetivo desta parte do estudo foi a avaliação da adequabilidade da utilização dos materiais utilizados, nomeadamente os RCD em betões para camadas superficiais de pavimentos.

Para a realização deste estudo foram produzidos os provetes apresentados na Figura 3. 21, nomeadamente lajes com 400x400x80 mm³. Destas lajes foram posteriormente cortados provetes com 5,15x6,35x38 cm³ para a realização dos ensaios de fadiga.



Figura 3. 21 As características dos quatro provetes de Referência e betão de RCD

O processo de medição da macro textura pelo método da altura de areia (ASTM E965-96) NP EN ISSO 13473-1 [80] consiste em espalhar, com movimentos circulares de um dispositivo apropriado (espalhador de madeira com revestimento de borracha) na superfície do pavimento, um volume conhecido de areia ou microesferas de vidro ($25000\text{mm}^3 \pm 150\text{mm}^3$). Mede-se o tamanho da mancha em 4 direções, e então, com a média, calcula-se a altura da macro textura, ou altura de areia, pela equação:

$$h_m = \frac{4V}{d_m^2 \cdot \pi} \quad (11)$$

Onde: h_m - = altura média de areia
 V = volume
 d_m = média das medidas da mancha na superfície do centro de provete.

A Figura 3. 22 mostra o equipamento para o ensaio de mancha de areia e provete do ensaio da profundidade média da textura (PMT).



Figura 3. 22 Ensaio de mancha de areia [84]

O valor da altura média da mancha de areia permite definir o tipo de textura da superfície do pavimento de acordo com o indicado na Tabela 3. 14, variando de uma superfície muito fina até muito grossa.

Tabela 3. 14 Limites de aplicação do revestimento segundo sua macro textura [81]

Textura superficial	Limites do valor de h_m (mm)		Aplicação do revestimento
	Mínimo	Máximo	
Muito fina		< 0,2	Não deve ser utilizado
Fina	0,2	0,4	Reservado p/ zona urbanas $V < 80$ km/h.
media	0,4	0,8	Indicado p/ vias com 80 km/h – 120 km/h.
Grossa	0,8	1,2	Indicado p/ vias rápidas $>$ de 120 km/h
Muita grossa		$>1,2$	Indicado em caso especiais

A avaliação da macrotextura dos betões foi também realizada recorrendo ao levantamento da superfície através de equipamento laser com o qual foi possível medir a profundidade média do perfil e também reproduzir a textura em três dimensões (3D).

A Figura 3. 23A apresenta o equipamento laser utilizado para obtenção da textura dos betões recorrendo ao levantamento de perfis da superfície do provete, espaçados de 1 mm, resultando no cálculo da profundidade média de 250 perfis por amostra. Com estes perfis foi também possível elaborar uma representação tridimensional da superfície dos provetes.

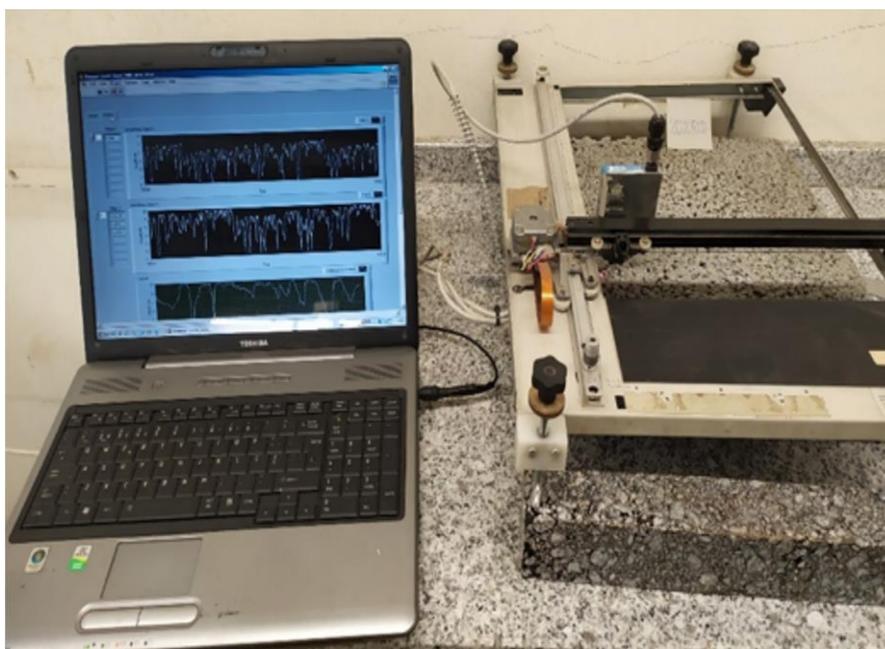


Figura 3. 23 Equipamento laser utilizado no ensaio de textura

3.5.14. Ensaio de determinação do coeficiente de resistência ao deslizamento com o pêndulo britânico

A determinação da resistência ao deslizamento foi realizada pelo método do Pêndulo Britânico utilizando o dispositivo medidor Portable Skid Resistance Tester EN 13036-4 [81] (Figura 3. 24). O procedimento do ensaio consiste em posicionar a superfície do provete, medir e registar a temperatura do ensaio e determinar o comprimento de deslizamento da borracha sobre a superfície do provete. As medições começam quando o braço do pendulo é libertado a partir de uma posição horizontal. Os valores do coeficiente de resistência ao escorregamento são lidos diretamente a partir da escala graduada.



Figura 3. 24 Pêndulo Britânico [85]

Foram ensaiadas 4 provetes da medida de 40 x 40 x 8 cm³ tendo sido efetuadas 3 medições na direção da direita para a esquerda e realizaram-se mais 3 medições em sentido contrário.

Com os resultados foram calculadas as médias, os desvios padrões, as incertezas padrões correspondentes às medições, as incertezas padrões associadas à calibração do dispositivo, e as incertezas combinadas e expandidas. A análise de incertezas aqui conduzida está em conformidade com o guia para a expressão da incerteza de medição GUM 2008 [82].

Os valores do coeficiente de atrito devem respeitar os limites definidos nas Tabela 3. 15 e Tabela 3. 16.

Tabela 3. 15 Valores de coeficiente de atrito pontual PTV (Pendulum test value)

Requisitos/ Propriedades	Unidade	Utilização
Especificidades de utilização		Ensaio com Pendulo britânico; deslizador grande com borracha sintética/CEN: Escala C
Coeficiente de atrito pontual	PTV	>60

Tabela 3. 16 Classe dos limites de BPN baseado na norma ASTM D3003

Classe	Limites BPN
Perigosa	< 25
Muito lisa	25 - 31
lisa	32 - 39
Insuficiente rugosa	40 - 46
Medianamente rugosa	47 - 57
Rugosa	55 - 75
Muito rugosa	>75

3.5.15. Ensaio de módulo dinâmico

O ensaio de módulo dinâmico foi realizado em vigas cortadas das lajes dos ensaios de textura e atrito, tendo-se utilizado vigas com $5,15 \times 6,35 \times 38$ cm³ as quais foram ensaiadas a várias frequências de carregamento e à temperatura de 20 °C.

3.5.16. Ensaio de resistência à fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados à temperatura de 20 °C e a uma frequência de 10 Hz, de acordo com a norma EN 12697-24 [83], utilizando o equipamento mostrado na Figura 3. 25. As leis de fadiga dos betões foram estabelecidas através de uma regressão linear entre os logaritmos da extensão aplicada e da vida à fadiga.

A principal característica para os betões terem sucesso no seu desempenho é a sua resistência ao fendilhamento por fadiga. Este ensaio vai permitir concluir qual dos quatro betões vai ter um melhor comportamento na resistência ao fendilhamento por fadiga.

Na determinação da resistência ao fendilhamento por fadiga é aplicada uma carga sinusoidal até se atingir a rotura por fadiga. Esta carga sinusoidal é feita com carregamentos repetidos de uma extensão controlada. A rotura do provete à fadiga é determinada com base no número de ciclos efetuados no ensaio, e a rotura é determinada pela diminuição do módulo para metade do seu valor inicial. Assim, sabendo a extensão aplicada, é possível obter uma série de pontos relativos ao comportamento à fadiga.



Figura 3. 25 Máquina do ensaio de fadiga

4. CONCEÇÃO DE BETÃO DRENANTE

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado em três fases. Na primeira fase foi estudado um betão drenante em que se variou a dosagem de cimento e a razão A/C de modo a verificar quais destes parâmetros permitem a conceção de um betão com resistência e permeabilidade adequada aos fins a que se destina.

Tendo em consideração que as características de drenabilidade de um betão estão relacionadas com a curva granulométrica dos agregados, neste trabalho utilizou-se como base para esta granulometria a recomendada para betões asfálticos, tendo-se escolhido o fuso granulométrico PA12.5 existente no Caderno de Encargos da Estradas de Portugal.

Na segunda fase foi estudado um betão drenante com agregados naturais para definir a formulação base que iria servir de referência ao estudo de betões com agregados reciclados, nomeadamente utilizando resíduos de construção e demolição (RCD). O betão drenante com agregados naturais foi estudado para três relações água/cimento (0.30, 0.35 e 0.40) e três tempos de vibração (20, 40 e 60 segundos). Foi utilizado 300 kg/m³ de cimento.

Na terceira fase foi concebido um betão drenante com agregados reciclados, tendo-se considerado três percentagens de agregados reciclados (10, 20 e 30%), sendo que as restantes variáveis foram as obtidas para o betão selecionado na segunda fase.

Em todas as fases, a conceção dos betões teve por base a avaliação do comportamento desses betões em ensaios ao betão fresco e ao betão endurecido, ensaios que foram listados no capítulo anterior.

4.1. ESTUDOS PRELIMINARES DE CONCEÇÃO DE BETÃO DRENANTE

Na primeira fase do estudo de betão drenante com agregados naturais, a ser utilizado para o estudo do betão drenante foram produzidos betões de cimento com razão (A/C) de 0,30, e cimento de 300 kg/m³, 0,35 de 350 kg/m³ e 0,40 de 400 kg/m³. Para cada um destes betões os provetes foram vibrados 15 segundos.

Foram utilizados agregados finos com a dimensão 0/4 mm e grossos de 4/10 e 10/14 mm no fabrico dos betões drenantes.

Na execução dos betões optou-se por uma betoneira de eixo vertical, com uma capacidade de 90 litros. Após a realização da amassadura e antes de encher os moldes, foi efetuado o ensaio de abaixamento segundo a norma NP EN 12350-2:2009 [59] por cada mistura, com o cone de Abrams. Os valores obtidos foram os inicialmente previstos como ensaios de abaixamento e Vêbê.

4.1.1. Abaixamento e vêbê

Na Figura 4.1A) apresenta-se fotos da realização dos ensaios de abaixamento e de vêbê aos betões em estudo neste trabalho, os quais foram utilizados para avaliar a trabalhabilidade dos betões produzidos, com agregados naturais, e com agregados artificiais.



Figura 4.1 A) Ensaio de abaixamento, B) Ensaio de vêbê

Os resultados do abaixamento obtidos de acordo com a norma NP EN 12350-2 de 2016 [59], aos betões com agregados naturais, são apresentados na Tabela 4. 1, verificando-se que segundo este ensaio, os betões não mostraram trabalhabilidade. Este facto resulta do facto deste betão ter uma granulometria aberta, composta principalmente por elementos grossos e finos que conjuntamente com o cimento fazem a calda para estabilizar os elementos grossos. A falta de elementos médios conduz à falta de trabalhabilidade do betão.

Também se apresenta nesta Tabela 4. 1 e Figura 4.1 os resultados dos ensaios de vêbê, ensaio que também é utilizado para definir a trabalhabilidade dos betões. Os ensaios de vêbê mostraram uma trabalhabilidade normal resultante de valores de vêbê entre 6 e 10 segundos, de acordo com a norma NP EN 12350-3 de 2011 [60]. Verifica-se que o aumento da razão A/C aumenta a trabalhabilidade do betão, pelos menores valores obtidos no ensaio de vêbê. A maior trabalhabilidade verifica-se para os betões com maior razão A/C.

Como conclusão pode dizer-se que para os betões drenantes, estudados neste trabalho, o ensaio de abaixamento não permitiu analisar a sua trabalhabilidade, sendo que um dos parâmetros que afeta a sua medição é a quantidade de água livre presente na amassadura.

Tabela 4. 1 Trabalhabilidade dos betões com agregados naturais

Betão	Abaixamento (mm) EN 12350-2:2016	Ensaio de Vb (s) EN 12350-3:2011	Media de Vb (s)
BN 0.30-20	0	8	8,0
BN 0.30-40	0	10	
BN 0.30-60	0	6	
BN 0.35-20	0	8	8,3
BN 0.35-40	0	9	
BN 0.35-60	0	8	
BN 0.40-20	0	6	6,2
BN 0.40-40	0	6,5	
BN 0.40-60	0	6	

4.1.2. Espalhamento

O ensaio de espalhamento foi realizado como se mostra na Figura 4.2, indicando-se na Tabela 4. 2 os valores obtidos no ensaio, sendo possível verificar a obtenção de valores de espalhamento entre 375 e 410 mm, a que corresponde uma classe de espalhamento F2 e F3. Não é clara a influência da razão água/cimento no espalhamento do betão devido ao facto de o valor máximo ter sido obtido para uma razão água/cimento de 0.35, valor intermédio desta razão. De qualquer modo, o espalhamento aumentou quando a razão água/cimento passou de 0.30 para 0.35, o que era de esperar.



Figura 4.2 Equipamento (A) e medição do espalhamento (B)

Tabela 4. 2 Resultados do ensaio de espalhamento dos betões com agregados naturais

Betão	Quantidade de Cimento (kg/m ³)	Medições (mm)	Média (mm)
BN 0,30	300	400 - 400	400
BN 0,35	350	400 - 420	410
BN 0,40	400	400 - 350	375

4.1.3. Massa volúmica fresca e teor de ar

Os valores da massa volúmica fresca dos betões com agregados naturais estão representados na Figura 4. 3 em função da razão água/cimento e da quantidade do cimento, onde é possível verificar a relação entre a massa volúmica fresca dos betões e a razão água/cimento ou % de ar.

Estes ensaios permitiram também obter o teor de ar dos betões, os quais são apresentados Tabela 4. 3, os quais variam entre 4,3 - 6,6%. Estes valores estão representados na Figura 4. 3, conjuntamente com a massa volúmica do betão fresco, onde é possível verificar o aumento do teor em ar com essa densidade. Como era esperado o volume de vazios (teor em ar) aumenta com a razão A/C e com a % de ar.

Tabela 4. 3 Massa volúmica do betão fresco e teor de ar

Cimento (Kg/m ³)	Betão	Massa volúmica fresca (kg/m ³)	Teor de ar (%)	Media
300	BN-0.30-20	1939	4,333	4,4
	BN 0.30 40	1894	4,833	
	BN 0.30 60	1886	4,167	
350	BN 0.35 20	1983	4,567	4,3
	BN 0.35 40	1965	4,033	
	BN 0.35 60	1971	4,300	
400	BN 0.40 20	2088	6,933	6,6
	BN 0.40 40	2081	6,533	
	BN 0.40 60	2045	6,467	

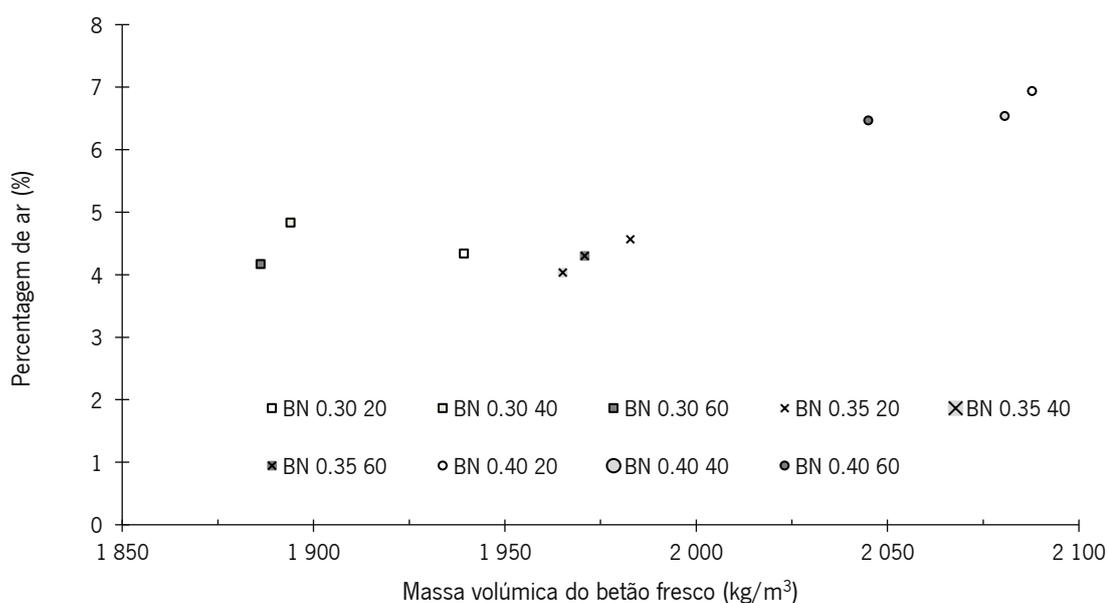


Figura 4. 3 Percentagem de ar em função da massa volúmica do betão fresco

4.1.4. Permeabilidade do KLCS

A Figura 4. 4 representa os procedimentos dos ensaios de permeabilidades KLCS (Coeficiente do Laboratório de Caminhos de Santander). Os resultados apresentam-se na Figura 4. 5 e Tabela 4. 4, encontrando-se entre 10 e 35 segundos conforme a norma da permeabilidade do KLCS.



Figura 4. 4 Ensaio de permeabilidade KLCS

Tabela 4. 4 Resultado médio dos ensaios de permeabilidade KLCS

Betão e A/C	Vibração (s)	B1	B2	Subtotal (s)
BN 300 0,30	20	12,4	13,5	12,95
	40	12,8	13,5	13,15
	60	12,3	13,8	13,05
BN 350 0,35	20	15,8	20,8	18,3
	40	16,1	22,4	19,25
	60	16,5	21,4	18,95
BN 400 0,40	20	37,2	30,9	34,05
	40	37,2	30,9	34,05
	60	37,2	30,9	34,05

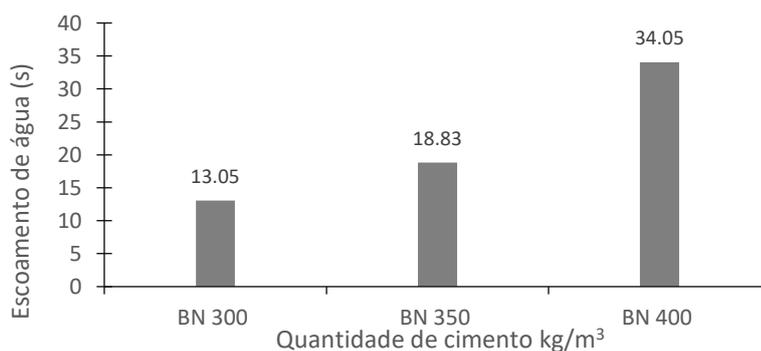


Figura 4. 5 Resultado média dos ensaios de permeabilidade de KLCS

4.1.5. Absorção de água por imersão

Através das Tabela 4. 5 e Figura 4. 6 pode analisar-se de uma forma compreensível a massa volúmica aparente betão drenante e a absorção de água por imersão dos diferentes provetes dos betões drenantes.

Tabela 4. 5 Absorção de água por imersão

Betões	M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	Absorção (%)	Média (%)	Desvio padrão (k)	Coefficiente de variação (%)
B 0.30 20	6534,60	4563,30	6284,60	12,68			
B 0.30 40	6662,00	4588,40	6373,70	13,90	13,21	0,51	3,86%
B 0.30 60	6602,80	4602,70	6341,60	13,06			
B 0.35 20	6814,00	4694,60	6524,20	13,67			
B 0.35 40	6387,80	4496,10	6138,50	13,18	13,61	0,33	2,46%
B 0.35 60	6602,50	4571,40	6318,30	13,99			
B 0.40 20	6818,70	4577,90	6496,10	14,40			
B 0.40 40	6882,90	4624,60	6559,50	14,32	14,18	0,26	1,84%
B 0.40 60	7027,70	4712,10	6707,90	13,81			

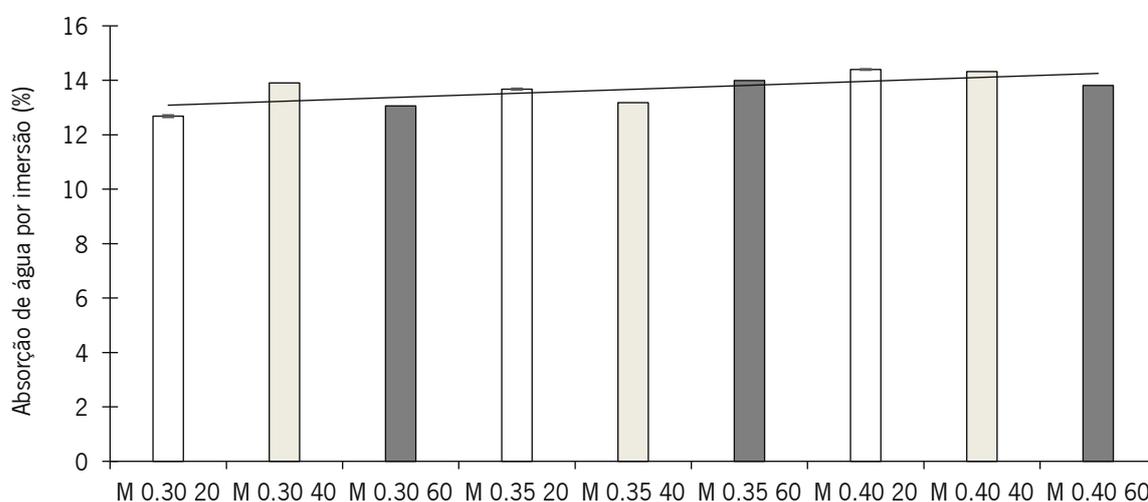


Figura 4. 6 Absorção de água por imersão

No betão BN 0.30, no geral obteve os valores inferiores da massa volúmica em relação aos restantes betões. No global verifica-se valores de porosidade entre 13,21 e 14,18 % para os referidos betões drenantes. Estes valores devem-se a melhor compactação dos betões com maior razão água cimento proporcionado pela sua maior trabalhabilidade.

4.1.6. Porosidade de imagem

A porosidade através de imagem dos betões com agregados naturais foi avaliada recorrendo à análise de imagem utilizando o procedimento descrito no capítulo anterior, tendo-se obtido imagens como as apresentadas na Figura 4. 7.

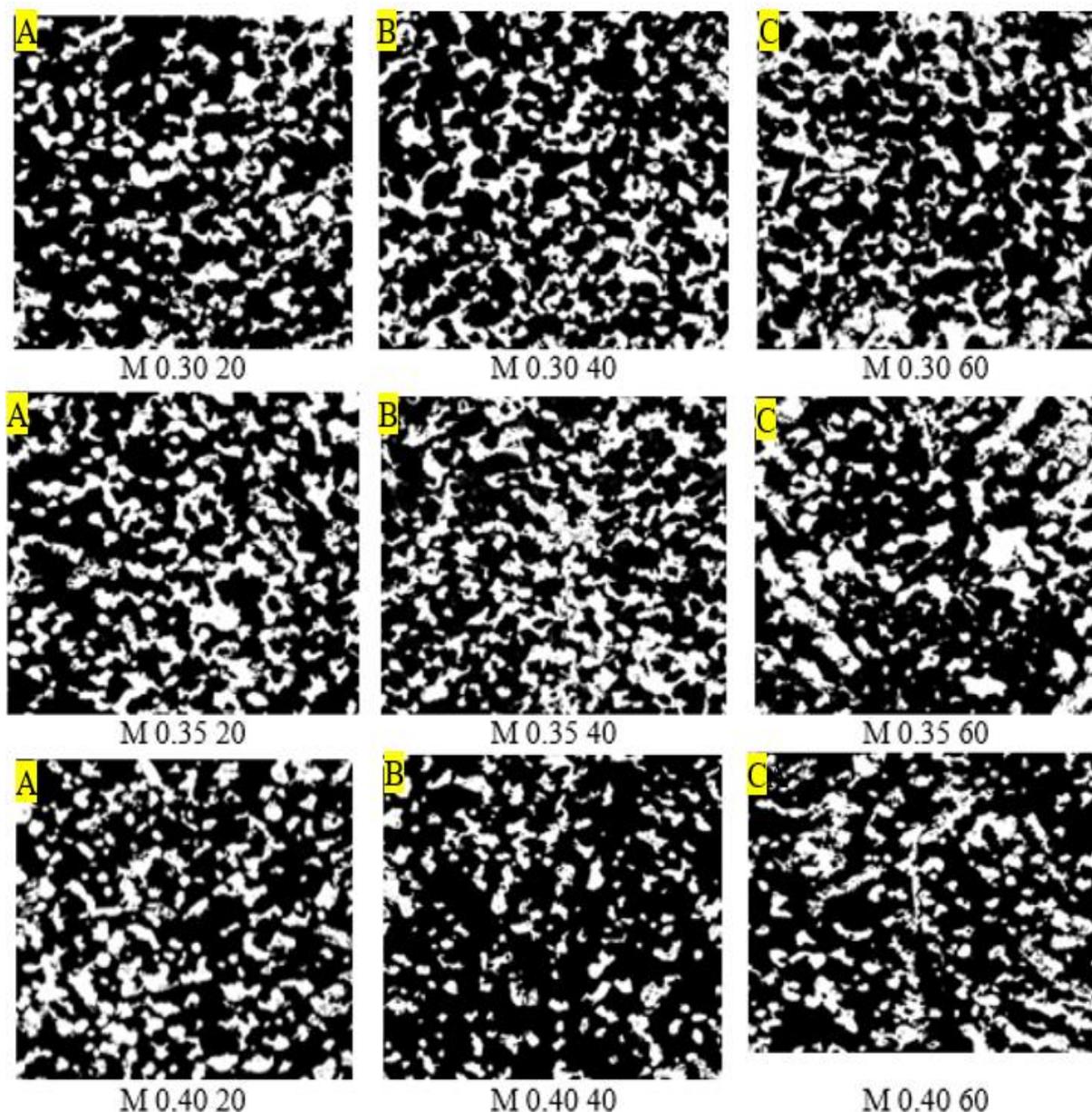


Figura 4. 7 Imagens utilizadas para avaliação da porosidade com suporte em imagem

No procedimento desenvolvido para esta análise, foi gerada uma imagem para cada face do provete, com as quais foi possível obter os valores de porosidade indicados na Tabela 4. 6 e representados na Figura 4. 7. Em termos médios pode dizer-se que a porosidade diminui com o aumento da razão A/C,

como se pode observar pela linha de tendência existente na Figura 4. 8. Para cada relação A/C não é perceptível o efeito da vibração na porosidade.

Tabela 4. 6 Porosidade através de imagem

Betão	Porosidade (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
BN 0.30 20	30,5%		2,86%	9,37%
BN 0.30 40	32,9%	32,37	0,98%	2,97%
BN 0.30 60	33,7%		0,70%	2,08%
BN 0.35 20	29,2%		1,72%	5,90%
BN 0.35 40	35,2%	31,83	1,18%	3,35%
BN 0.35 60	31,1%		0,85%	2,74%
BN 0.40 20	26,7%		1,95%	7,30%
BN 0.40 40	27,9%	26,10	1,40%	5,01%
BN 0.40 60	23,7%		2,43%	10,25%

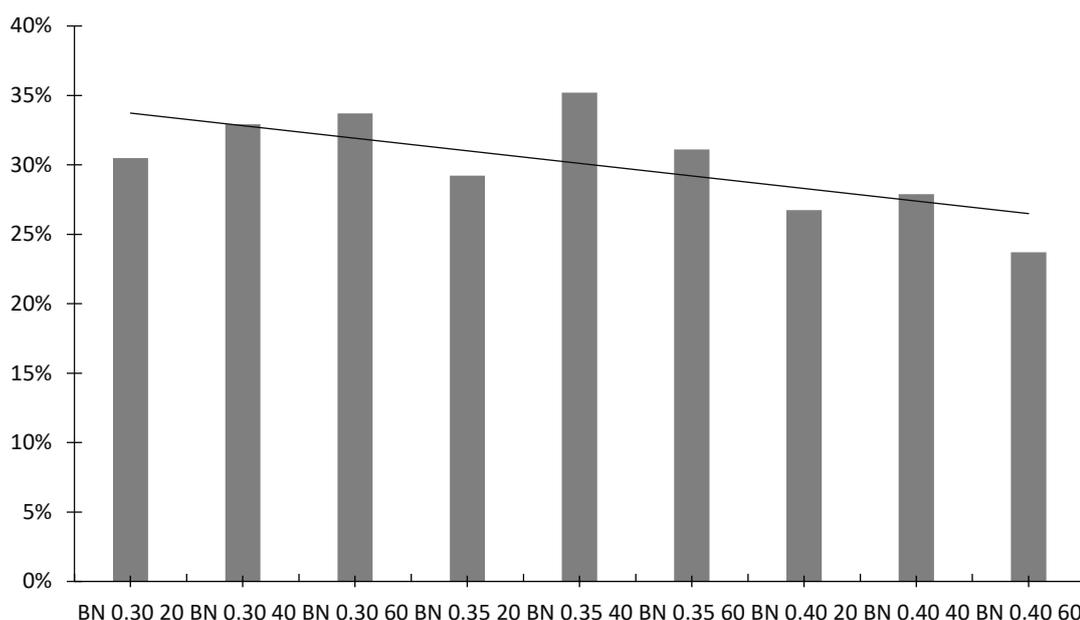


Figura 4. 8 Porosidade através de imagem

A porosidade avaliada por imagem da superfície dos provetes encontra-se entre 23% até 35%, não se encontrando muito distante dos 13,21 e 14,18 % obtidos no ensaio de absorção de água por imersão. A relação entre estas duas porosidades está representada na Figura 4. 9, não parecendo haver uma relação entre os dois valores. Isto deve-se ao facto de a porosidade por imagem apenas avaliar a porosidade superficial, não conseguindo avaliar a porosidade no interior dos provetes. No entanto, a diferença entre estes dois valores é muito significativa.

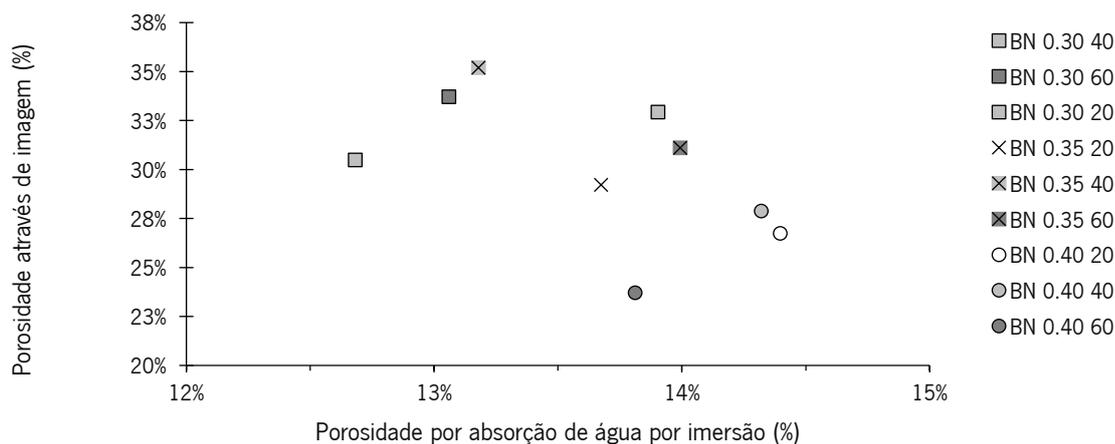


Figura 4. 9 Relação da porosidade através de imagem com a obtido por absorção de água por imersão

4.1.7. Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios à compressão dos betões com agregados naturais encontram-se agrupados na Tabela 4. 7 e representados na Figura 4. 10.

Tabela 4. 7 Resultados dos ensaios da resistência à compressão com vibração

Cimento Kg/m ³	Idade	Betão	Massa (kg)	Força (kN)	Tensão de Compressão (MPa)	Média (MPa)
300	28	BN1	6,68	389,90	17,3	16,3
		BN2	6,60	398,70	17,7	
		BN3	6,48	311,50	13,8	
350	28	BN1	7,62	818,00	36,4	34,6
		BN2	7,26	675,70	30,0	
		BN3	7,38	843,00	37,5	
400	28	BN1	6,76	436,80	19,4	23,7
		BN2	7,20	680,50	30,2	
		BN3	6,88	484,20	21,5	

Verificou-se que para cada betão a vibração influenciou os valores da permeabilidade, tal como indicado na Figura 4. 10. Nesta avaliação, mostra a correlação obtida entre a permeabilidade e a resistência à compressão e a permeabilidade do betão drenante entre razão água cimento.

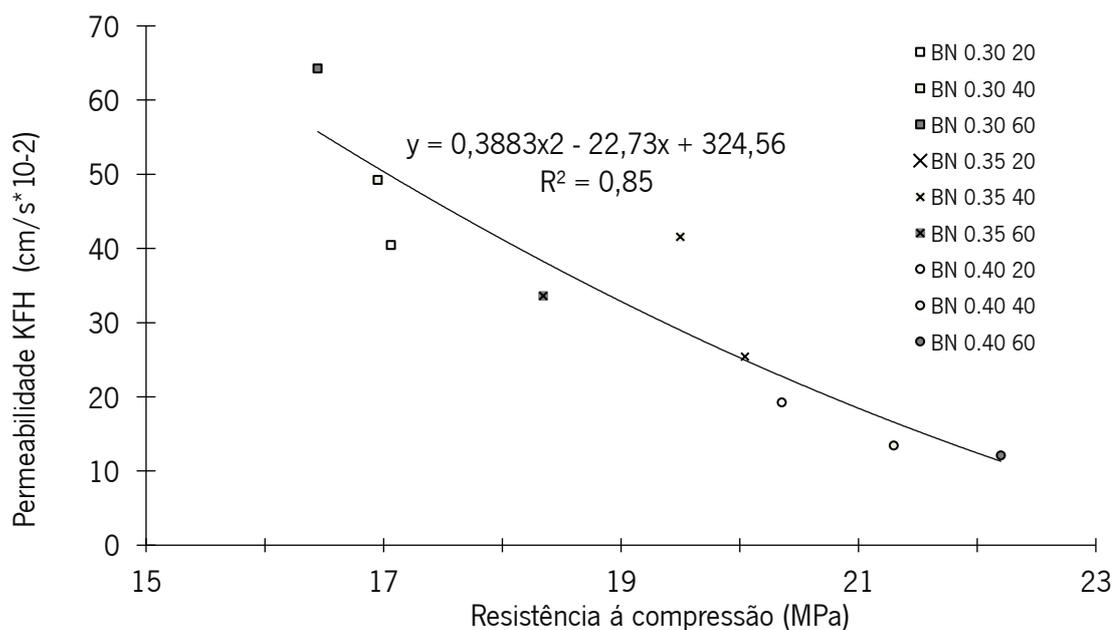


Figura 4. 10 Relação entre a permeabilidade K_{FH} e a resistência à compressão

4.1.8. Resistência à tração

Na Tabela 4. 8 e Figura 4. 11 mostra-se os resultados obtidos para a resistência à tração, tendo-se obtido valores entre 1,5 MPa a 2,34 MPa.

Tabela 4. 8 Resultado dos ensaios de resistência à tração com os provetes cilíndricos

Cimento (kg/m³)	Betão A/C e vibração	F.máx. média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
300	BN 0.30 20	1,68	0,05	3,0%
	BN 0.30 40	1,54	0,10	6,6%
	BN 0.30 60	1,70	0,27	16,1%
350	BN 0.35 20	1,80	0,21	11,8%
	BN 0.35 40	1,91	0,18	9,3%
	BN 0.35 60	1,69	0,32	18,9%
400	BN 0.40 20	2,03	0,07	3,4%
	BN 0.40 40	2,34	0,25	10,6%
	BN 0.40 60	1,53	0,12	7,8%

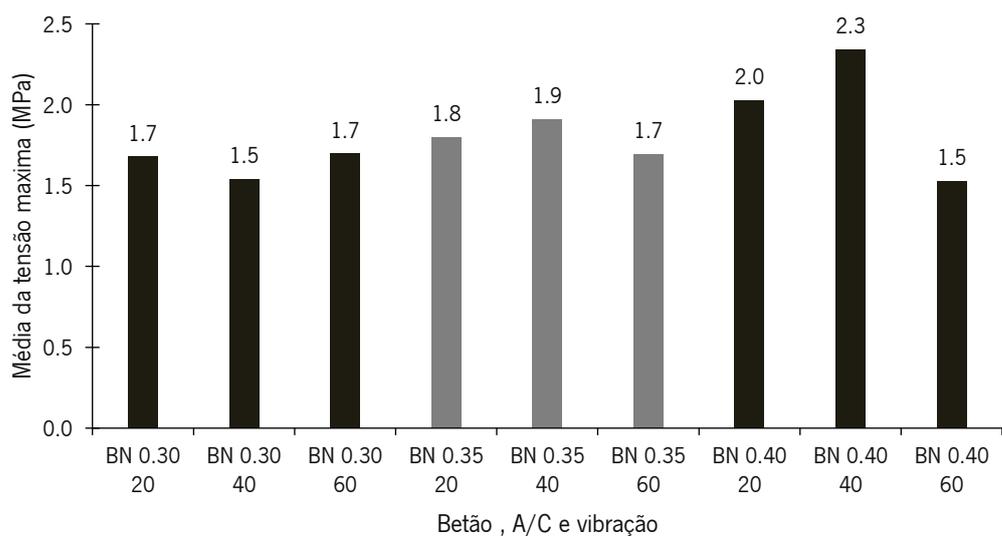


Figura 4. 11 Resultado dos ensaios da média de tração

4.1.9. Abrasão por cântabro

A Tabela 4. 9 e Figura 4. 12 apresenta os resultados do ensaio de abrasão por cântabro e a sua correlação com a resistência à compressão, tendo-se obtido valores médios entre 16,4 – 19,0%. Os resultados de cântabro para relações W/C mais baixas correspondem a betão com maior abrasão.

Tabela 4. 9 Resultado de abrasão por cântabro

Cimento (kg/m ³)	Betões A/C	Vibração	Massa inicial (g)	Massa após desgaste (g)	Desgaste (%)	Média (%)
300	BN 0,30	20	1130,0	887,6	21,5	19,0
		40	1096,5	896,9	18,2	
		60	1088,3	898,3	17,5	
350	BN 0,35	20	1063,8	870,5	18,2	17,9
		40	1109,9	905,7	18,4	
		60	1053,7	874,5	17,0	
400	BN 0,40	20	1114,3	923,3	17,1	16,4
		40	1105,1	971,5	12,1	
		60	1136,6	987,9	20,0	

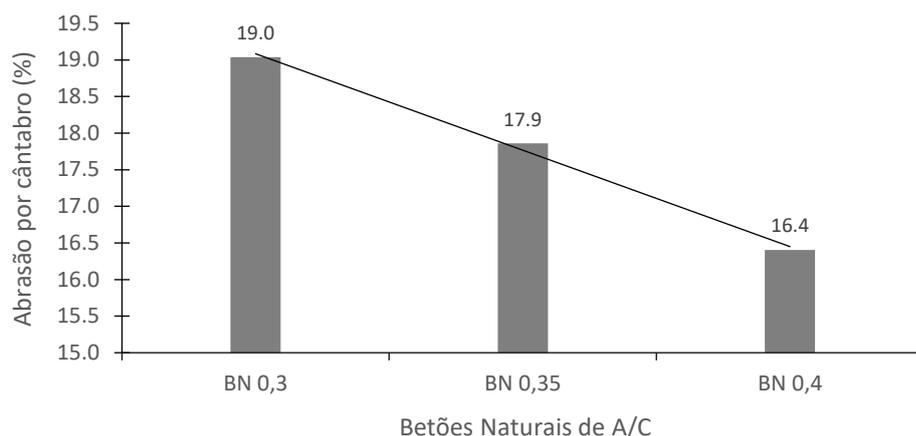


Figura 4. 12 Abrasão por cântabro dos betões

O betão com maior relação A/C (B 0,40) apresentou a menor abrasão e maior resistência à compressão, sendo visível que o aumento da relação A/C produz melhores betão com alta resistência à compressão e baixa abrasão cântabro. Um ajuste linear pode ser proposto para essa relação como se observa na Figura 4. 12.

4.1.10. Consideração final

O desenvolvimento da primeira fase deste trabalho permitiu verificar que com o fuso granulométrico PA12.5 utilizado em betões asfálticos e com uma dosagem de cimento de 300 kg/m³ pode obter-se um betão com a permeabilidade e resistência adequada aos fins a que se destina, pelo que para a segunda fase do trabalho será utilizada esta dosagem de cimento.

4.2. CONCEÇÃO DE BETÃO DRENANTE COM 300 KG CIMENTO /M³

Na segunda fase do estudo de betão drenante com agregados naturais, a ser utilizado como referência para o estudo do betão drenante com agregados reciclados, foram utilizadas diferentes razões A/C, nomeadamente 0.30, 0.35 e 0.40, submetendo os betões a três diferentes tipos de vibração, nomeadamente 20, 40 e 60 segundos e mantendo o cimento de 300 kg/m³. Foram realizados ensaios ao betão fresco e endurecido.

4.2.1. Abaixamento e vêbê

Os resultados dos ensaios de abaixamento e vêbê ao betão fresco são apresentados na Tabela 4. 10, verificando-se que o abaixamento foi de 0 mm para todos os betões enquanto que o vêbê apresenta valores entre 6 e 11 segundos.

Tabela 4. 10 Abaixamento e Vêbê

Propriedades Unidades		Norma	Cimento kg/m ³	Betão	Tempo de vibração (s)		
					20	40	60
Abaixamento	mm	NP EN 12350- 2:2016 [59]	300	BN 0.30	0	0	0
				BN 0.35	0	0	0
				BN 0.40	0	0	0
Vêbê	s	NP EN 12350- 3:2011 [60]	300	BN 0.30	8	10	11
				BN 0.35	7	9	8
				BN 0.40	6	6,5	6

4.2.2. Massa volúmica fresca

Os valores da massa volúmica fresca dos betões com agregados naturais estão apresentados na Tabela 4. 11 e representados na Figura 4. 13 em função da razão água/cimento, onde é possível verificar a relação linear entre a massa volúmica fresca dos betões e a razão água/cimento. A equação de melhor ajuste permite ser utilizada para estimar a massa volúmica fresca de outros betões com uma mistura de agregados semelhante à utilizada neste trabalho e para uma quantidade de cimento de 300 kg/m³.

Os resultados dos ensaios de massa volúmica fresca encontram-se na Tabela 4. 11, onde se apresentam os resultados das várias medições e o valor médio para cada razão água/cimento. Como se verifica, o valor médio da massa volúmica varia entre 2053,6 e 2223,8 g/cm³.

Tabela 4. 11 Massa volúmica fresca dos betões com agregados naturais

Betão A/C	Quantidade de cimento (kg/m ³)	Massa volúmica fresca (g/cm ³)			Média (g/cm ³)
		20	40	60	
BN 0,30	300	2056,5	2054,8	2049,6	2053,6
BN 0,35		2147,6	2130,6	2124,1	2134,1
BN 0,40		2209,6	2234,6	2227,1	2223,8

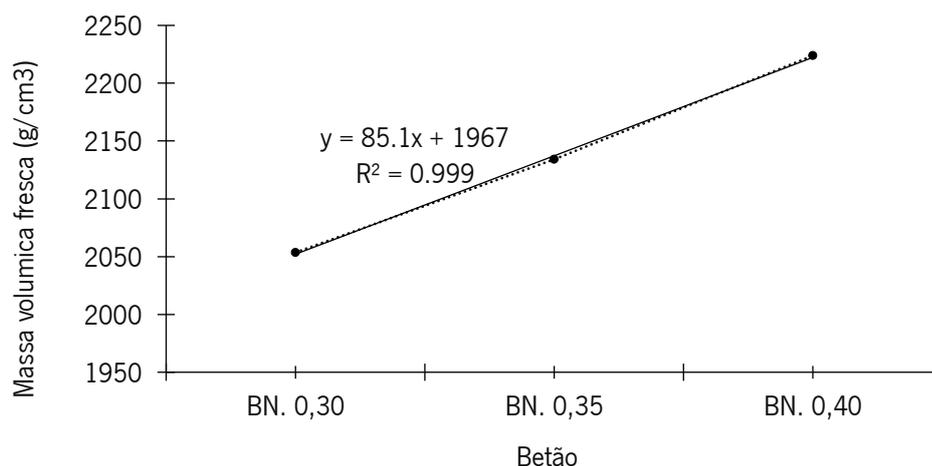


Figura 4. 13 Variação da massa volúmica fresca com a razão água/cimento dos betões com agregados naturais

4.2.3. Permeabilidade com o permeâmetro LCS

A permeabilidade com o permeâmetro LCS foi avaliada em cubos de 15x15x15 cm³ e lajetas de 30x30x8 cm³, como se observa na Figura 4. 14.



Figura 4. 14 Ensaio de permeabilidade LCS em cubos (A) e lajetas (B) e (C) resultado

Os resultados dos ensaios em cubos de 15x15x15 cm³ apresentam-se na Tabela 4. 13 e representam-se na Figura 4. 16. Os ensaios são baseados na norma EN 13108-7:2013 [84].

Neste contexto, os betões BN 0.30 e BN 0.35 satisfazem os requisitos para os pavimentos drenantes em que se obriga a que o escoamento esteja entre 10 e 30 segundos. O BN 0.40 está ligeiramente acima deste valor. Como o principal objetivo dos betões drenantes é a rápida remoção da água que chega à sua superfície, o BN 0.30 é o que melhor responde a este objetivo.

Tabela 4. 12 Permeabilidade com permeâmetro LCS em cubos

Betões naturais	Tempo de vibração (s)	Permeabilidade (s)		Média (s)
		Provete A	Provete B	
BN 300 0.30	20	16,47	21,70	18,38
		17,64	19,13	
		17,05	20,42	
	40	15,19	16,06	
		15,71	16,73	
		15,45	16,40	
	60	11,72	14,35	
		10,63	17,83	
		11,17	16,09	
BN 300 0.35	20	32,47	25,18	25,94
		23,97	26,19	
		28,22	25,69	
	40	20,58	16,61	
		13,84	21,03	
		17,21	18,82	
	60	17,75	24,40	
		19,28	22,89	
		18,52	23,65	
BN 300 0.40	20	34,11	23,57	31,88
		56,37	29,65	
		45,24	26,61	
	40	40,26	42,09	
		57,39	40,26	
		48,83	41,18	
	60	45,38	44,60	
		52,72	39,38	
		49,05	41,99	

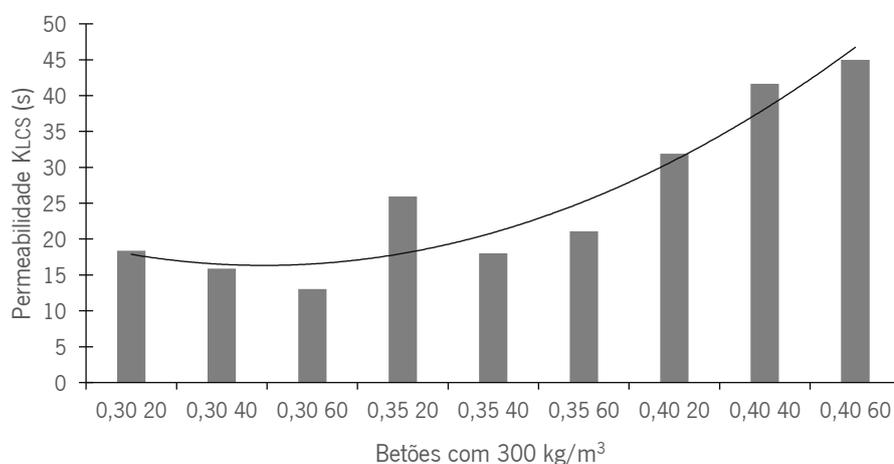


Figura 4. 15 Permeabilidade com permeâmetro KLCS em cubos

A permeabilidade K_{LCS} obtida nas lajetas produzidas com os betões com agregados naturais encontram-se na Tabela 4. 13, tendo-se obtido escoamentos entre 5 e 14,6 mm/segundos.

Contrariamente aos ensaios em cubos, nas lajetas verificou-se que o tempo de escoamento diminuiu com o aumento da razão A/C, e só o BN 0.30 apresenta permeabilidade entre 10 e 30 segundos. Também se verifica que o tempo de escoamento no betão diminuiu com o tempo de vibração, ou seja, aumentou os poros comunicantes e assim permite um melhor escoamento da água. Isto é observado na Figura 4. 16 com a linha tendência. A análise da Figura 4. 16 permite concluir que o tempo de escoamento aumentou com o aumento da razão A/C.

Tabela 4. 13 Permeabilidade K_{LCS} obtida nas lajetas de betão com agregado natural

Quantidade do cimento Kg/m ³	Betão	Permeabilidade (mm/s)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
300	BN 0.30-20	14,59	0,15	1,6%
	BN 0.30 40	12,94	0,14	1,5%
	BN 0.30 60	12,00	0,12	0,9%
300	BN 0.35 20	8,45	0,17	1,44%
	BN 0.35 40	9,00	0,08	0,94%
	BN 0.35 60	8,72	0,05	0,81%
300	BN 0.40 20	6,50	0,06	0,89%
	BN 0.40 40	5,59	0,06	0,88%
	BN 0.40 60	5,00	0,06	0,80%

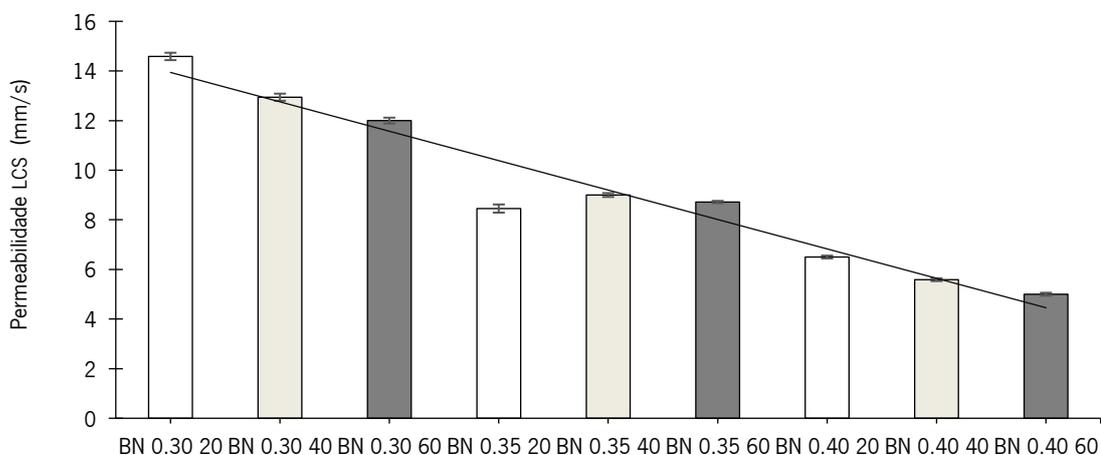


Figura 4. 16 Permeabilidade K_{LCS} medida nas lajetas de betão com agregados naturais

4.2.4. Permeabilidade com o permeâmetro FH

A permeabilidade dos betões com agregados naturais também foi obtida com o permeâmetro FH, tendo-se obtido os resultados presentes na Tabela 4. 14 os quais estão representados na Figura 4. 17.

Tabela 4. 14 Permeabilidade Falling Head dos betões com agregados naturais

Cimento kg/m ³	Betão	Face A Permeabilidade-(cm/sx10 ²)	Face B Permeabilidade-(cm/sx10 ²)	Media	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
300	BN-0.30-20	44,73	35,09	39,91	1,87	0,09
	BN 0.30 40	51,11	47,15	49,13	0,54	0,03
	BN 0.30 60	79,09	48,38	63,74	2,67	0,17
300	BN 0.35 20	22,68	25,75	24,22	2,78	0,11
	BN 0.35 40	38,66	39,17	38,92	1,61	0,09
	BN 0.35 60	40,03	28,79	34,41	2,64	0,11
300	BN 0.40 20	12,01	24,55	18,28	11,45	0,43
	BN 0.40 40	10,83	13,63	12,23	6,27	0,15
	BN 0.40 60	10,77	13,28	12,02	4,38	0,10

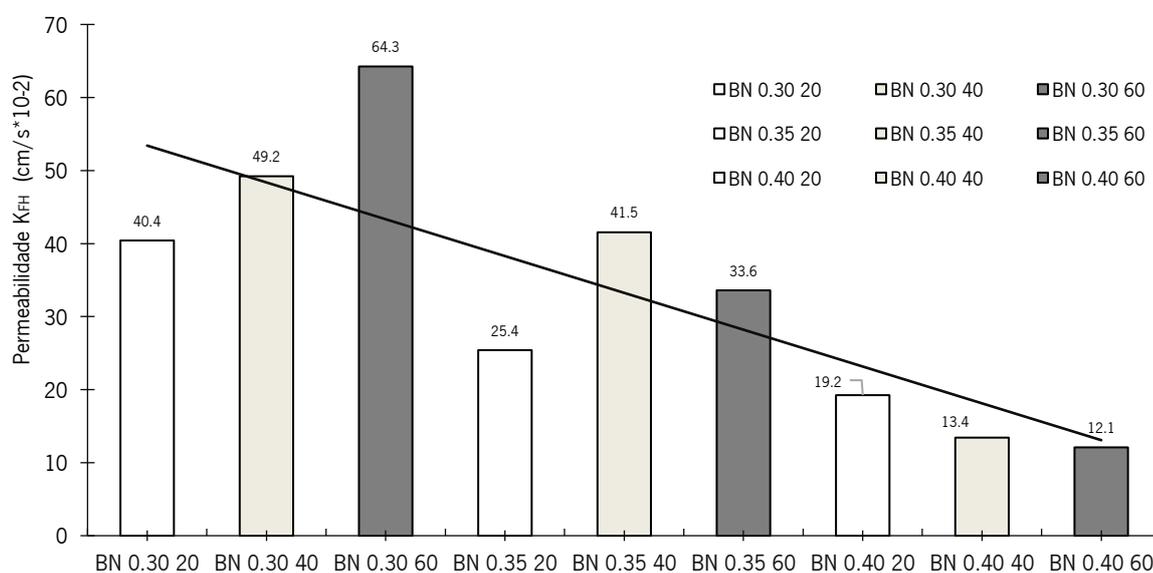


Figura 4. 17 Permeabilidade Falling Head dos betões com agregados naturais

Numa análise geral do conjunto dos betões drenantes do estudo, os valores obedecem a uma tendência de descida da permeabilidade com o aumento da razão água/ligante. Isto deve -se à melhor compactação dos betões com maior razão água cimento resultante da sua melhor trabalhabilidade.

Além disto, verifica-se que valores da permeabilidade comparados dentro de cada razão A/C para os vários tempos de vibração, nem sempre são coerentes. Isto verifica-se porque a permeabilidade aumenta com o tempo de vibração para o BN 0.40, mas diminui para o BN 0.30, enquanto para o BN 0.35 a permeabilidade tem um mínimo para 40 segundos de vibração. Este facto pode ser observado na Figura 4. 18 e Figura 4. 19.

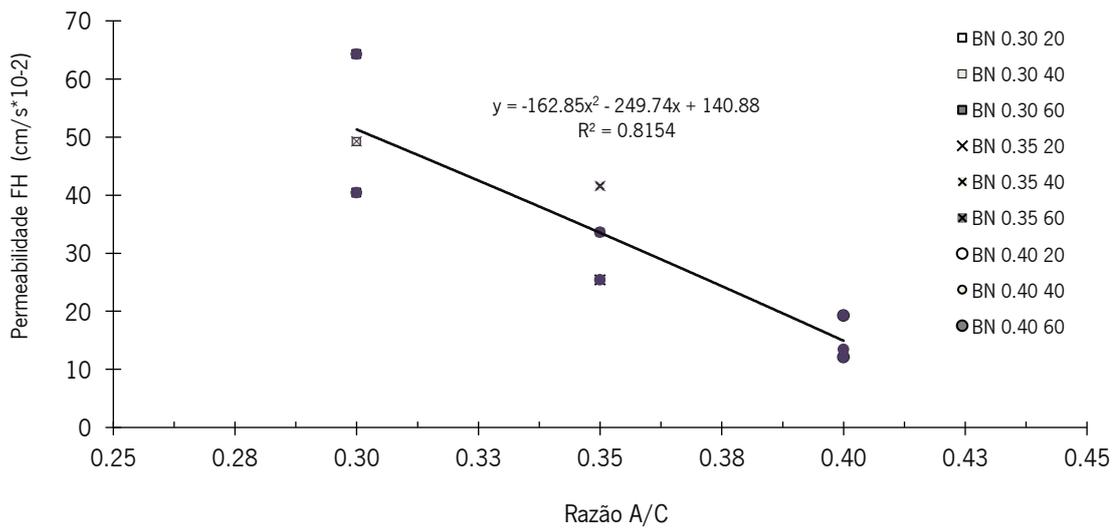


Figura 4. 18 Permeabilidade K_{FH} função da razão A/C

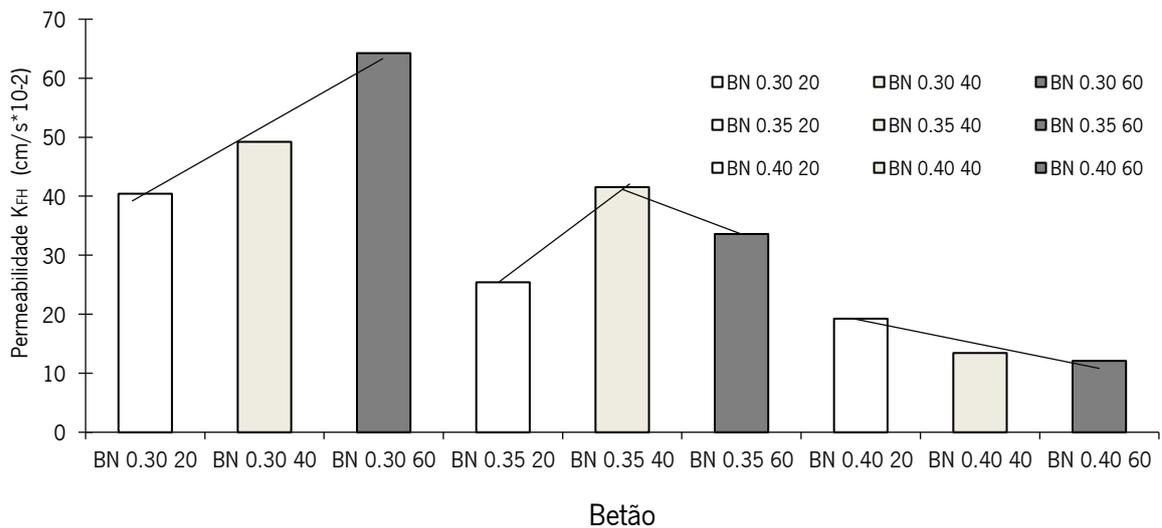


Figura 4. 19 Os resultados da permeabilidade K_{FH}

A permeabilidade obtida pelos dois permeâmetros (LCS e FH) conduziram a valores diferentes, principalmente em termos de influência dos vários parâmetros na permeabilidade. Assim, na

Tabela 4. 15 apresenta-se a comparação entre estes dois valores, que também é visível na Figura 4. 20, sendo possível observar que há uma relação entre eles, apesar de alguma dispersão.

Tabela 4. 15 Comparação da permeabilidade obtida pelo KLCS e KF_H

Cimento Kg/m ³	Betões, A/C e vibração	Permeabilidade KLCS (mm/s)	Permeabilidade KF _H (cm/sx10 ⁻²)
300	BN 0.30 20	14,59	40,42
	BN 0.30 40	12,94	49,22
	BN 0.30 60	12,00	64,25
300	BN 0.35 20	8,45	25,41
	BN 0.35 40	9,00	41,55
	BN 0.35 60	8,72	33,60
300	BN 0.40 20	6,50	19,25
	BN 0.40 40	5,59	13,43
	BN 0.40 60	5,00	12,10

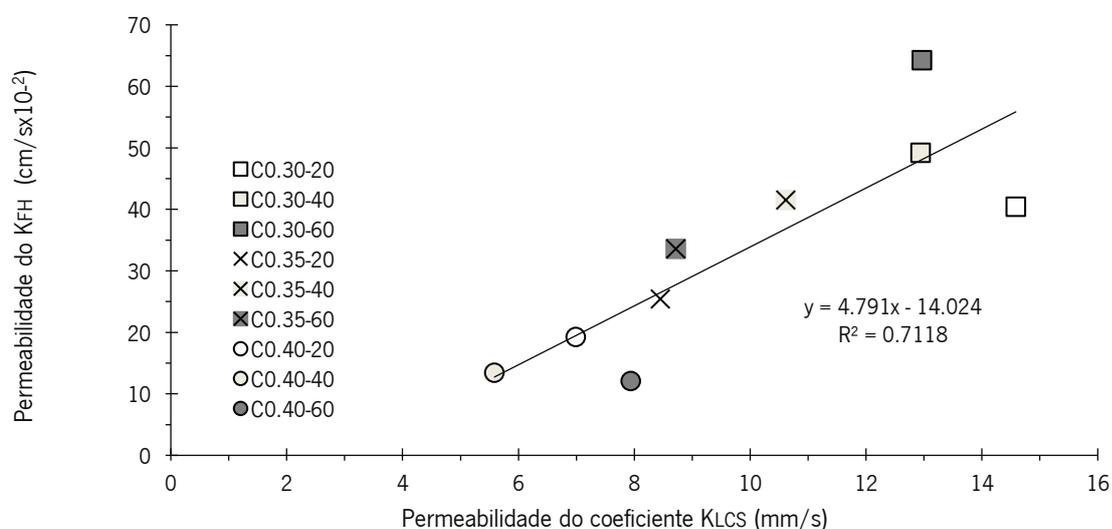


Figura 4. 20 Corelação da permeabilidade obtida pelo KLCS e KF_H

4.2.5. Absorção de água por imersão

Os ensaios de absorção de água por imersão foram realizados para avaliar o volume de vazios dos betões endurecidos bem como a massa volúmica aparente. Estes valores estão condensados na Tabela 4. 16 e na Tabela 4. 17 em que para a massa volúmica aparente inclui-se o desvio padrão e o coeficiente de variação das medições realizadas.

Tabela 4. 16 Absorção de água por imersão

Betões	CIM kg/m ³	Massa do provete (g)	Dimensões (mm) espessura			Volume (mm ³)	Massa volumica aparente (kg/m ³)	Média da massa volumica aparente (kg/m ³)	Des-vio Pad- rão (N)	Coefi- ciente de Varia- ção (%)
			L1 (lar- gura)	L2 (Espes- sura)	Altura					
BN 0.30 20s	300	1953,50	100,30	100,70	102,70	1037291,57	1883,27	1870,66	12,85	0,69%
		1919,90	100,30	100,50	101,30	1021119,20	1880,19			
		1928,60	100,70	100,10	102,90	1037239,20	1859,36			
		1912,30	100,50	100,60	101,70	1028217,51	1859,82			
BN 0.30 40s	300	1990,30	100,50	100,80	103,20	1045457,28	1903,76	1882,47	23,30	1,24%
		1933,90	100,74	99,82	103,89	1044704,00	1851,15			
		1972,30	100,70	100,10	103,20	1040263,22	1895,96			
		1979,70	100,90	100,50	103,90	1053592,76	1879,00			
BN 0.30 60s	300	1930,30	100,10	100,60	100,70	1014055,04	1903,55	1887,85	24,84	1,32%
		1976,20	100,80	100,00	103,10	1039248,00	1901,57			
		1890,00	100,00	100,60	101,50	1021090,00	1850,96			
		1937,20	100,00	100,70	101,50	1022105,00	1895,30			
BN 0.35 20s	300	1910,90	100,02	100,05	101,18	1012508,36	1887,29	1902,37	20,91	1,10%
		1908,70	99,94	100,14	101,14	1012208,27	1885,68			
		1938,70	99,95	99,92	101,85	1017176,36	1905,96			
		1958,20	100,19	100,05	101,19	1014329,52	1930,54			
BN 0.35 40s	300	2014,10	100,43	100,38	101,78	1026060,81	1962,94	1952,56	23,40	1,20%
		1975,30	100,39	101,08	101,50	1029963,25	1917,84			
		2023,10	100,71	100,20	101,83	1027580,99	1968,80			
		2010,00	100,24	100,85	101,41	1025174,38	1960,64			
BN 0.35 60s	300	1968,90	99,94	100,49	101,40	1018357,22	1933,41	1918,78	20,28	1,06%
		1925,80	100,06	100,96	100,85	1018792,51	1890,28			
		1964,00	99,94	101,09	101,34	1023831,39	1918,28			
		1980,80	100,07	101,56	100,82	1024644,67	1933,16			
BN 0.40 20s	300	2029,30	101,50	100,90	103,10	1055883,19	1921,90	1962,31	44,02	2,24%
		2004,00	101,50	100,40	101,50	1034345,90	1937,46			
		2021,70	100,80	100,30	101,60	1027200,38	1968,17			
		2093,10	101,10	100,20	102,20	1035308,48	2021,72			
BN 0.40 40s	300	2105,20	100,30	101,10	104,10	1055608,35	1994,30	1984,59	17,62	0,89%
		2055,50	100,40	101,40	103,00	1048597,68	1960,24			
		2086,20	101,20	100,70	103,20	1051694,69	1983,66			
		2103,70	101,30	100,90	102,90	1051758,39	2000,17			
BN 0.40 60s	300	2071,00	99,44	100,10	105,30	1048150,30	1975,86	1966,31	26,75	1,36%
		2045,40	100,70	99,67	104,30	1046835,01	1953,89			
		2022,80	98,98	97,76	104,60	1012139,39	1998,54			
		2028,70	99,33	101,00	104,40	1047375,25	1936,94			

Tabela 4. 17 Massa volúmica aparente e volume de vazios dos betões

Cimento (kg/m ³)	Betão	Massa volúmica aparente (kg/m ³)	Desvio Padrão (N)	Coefficiente de Variação (%)	Volume de vazios (%)
300	BN 0.30 20	1870,66	12,85	0,69%	23,9
	BN 0.30 40	1882,47	23,30	1,24%	24,6
	BN 0.30 60	1887,85	24,84	1,32%	23,9
	BN 0.35 20	1902,37	20,91	1,10%	23,9
	BN 0.35 40	1952,56	23,40	1,20%	22,3
	BN 0.35 60	1918,78	20,28	1,06%	23,8
	BN 0.40 20	1962,31	44,02	2,24%	21,0
	BN 0.40 40	1984,59	17,62	0,89%	20,1
	BN 0.40 60	1966,31	26,75	1,36%	20,9

O volume de vazios está representado na Figura 4. 21 onde é visível uma redução do volume de vazios com aumento da razão A/C e dentro desta, verifica-se uma tendência para os vazios reduzirem com o aumento do tempo de vibração. O volume de vazios varia entre os 24,6 e 20,1%, valores adequados para betões drenantes para pavimentos de estradas.

Como era de esperar, o aumento da massa volúmica aparente conduziu a menores volumes de vazios no betão, pelo que a obtenção de betões drenantes deve ser uma relação de compromisso com a massa volúmica aparente que irá condicionar o comportamento mecânico dos betões.

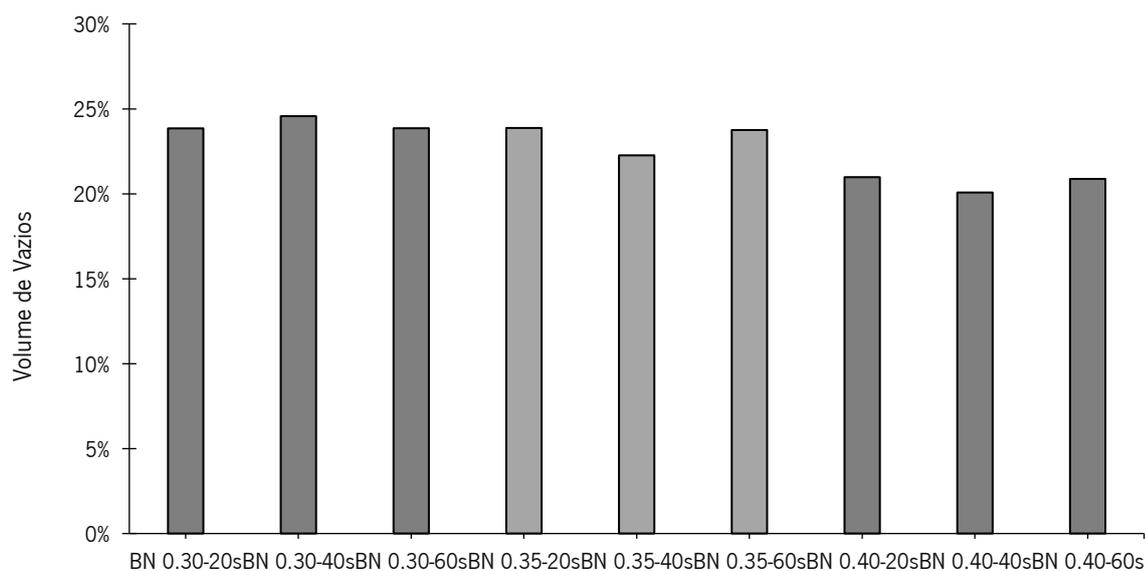


Figura 4. 21 Volume de vários dos betões com agregados naturais

4.2.6. Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios à compressão dos betões com agregados naturais estão agrupados na Tabela 4. 18 e representados na Figura 4. 22.

Da realização dos ensaios pode dizer-se que as roturas foram consideradas satisfatórias (normal) para os ensaios realizados, tendo-se obtido resistências à compressão entre 16,45 e 22,20 MPa, satisfazendo deste modo os critérios de compressão para os pavimentos drenantes.

Globalmente, verificou-se que o aumento da razão A/C aumentou a resistência à compressão, sendo que para cada A/C o tempo de vibração conduziu a tendências não constantes, ou seja, para A/C=0.30 o tempo de vibração diminuiu a resistência à compressão, para A/C=0.35 verificou-se um aumento e uma diminuição, enquanto para A/C 0.40 verificou-se um aumento da resistência com o aumento do tempo de vibração.

Tabela 4. 18 Resistência à compressão dos betões com agregados naturais

Cimento (kg/m ³)	Betão	Tensão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
300	BN 0.30 20	17,06	0,73	4,3%
	BN 0.30 40	16,95	0,66	3,9%
	BN 0.30 60	16,45	0,34	2,0%
300	BN 0.35 20	20,04	0,14	0,7%
	BN 0.35 40	21,67	0,53	2,5%
	BN 0.35 60	18,34	0,07	0,4%
300	BN 0.40 20	20,35	1,12	5,5%
	BN 0.40 40	21,30	0,15	0,7%
	BN 0.40 60	22,20	0,24	1,1%

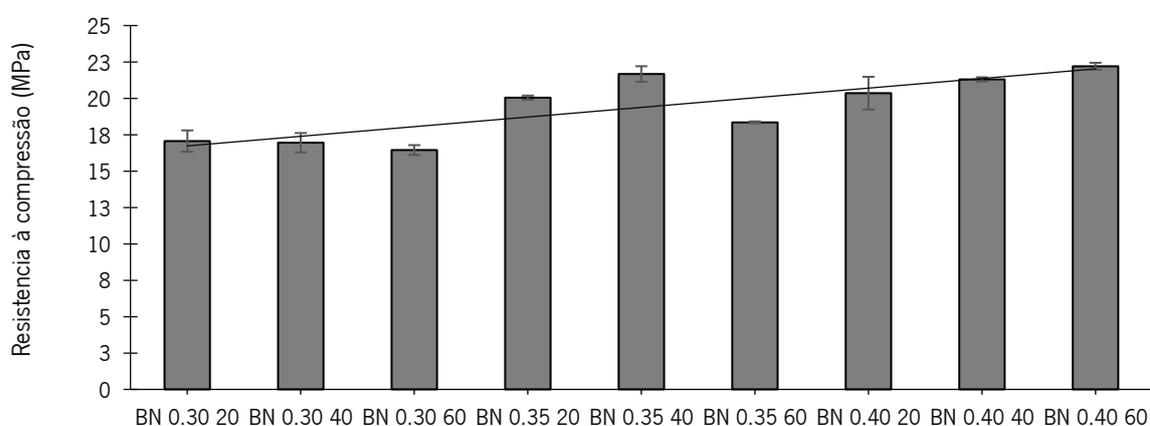


Figura 4. 22 Resistência à compressão dos betões com agregados naturais

Na Tabela 4. 19 e Figura 4. 23 comparam-se os valores da resistência à compressão com a absorção de água por imersão, verificando-se que a resistência mecânica à compressão diminui com o aumento da porosidade. Os valores obtidos acompanham de perto os valores tidos como referência.

Tabela 4. 19 Resultado da relação da resistência à compressão e porosidade por imersão

Betão	Tensão (MPa)	Absorção por imersão (%)
BN 0.30-20	17,06	23,9
BN 0.30 40	16,95	24,6
BN 0.30 60	16,45	23,9
BN 0.35 20	20,04	23,9
BN 0.35 40	21,67	22,3
BN 0.35 60	18,34	23,8
BN 0.40 20	20,35	21,0
BN 0.40 40	21,30	20,1
BN 0.40 60	22,20	20,9

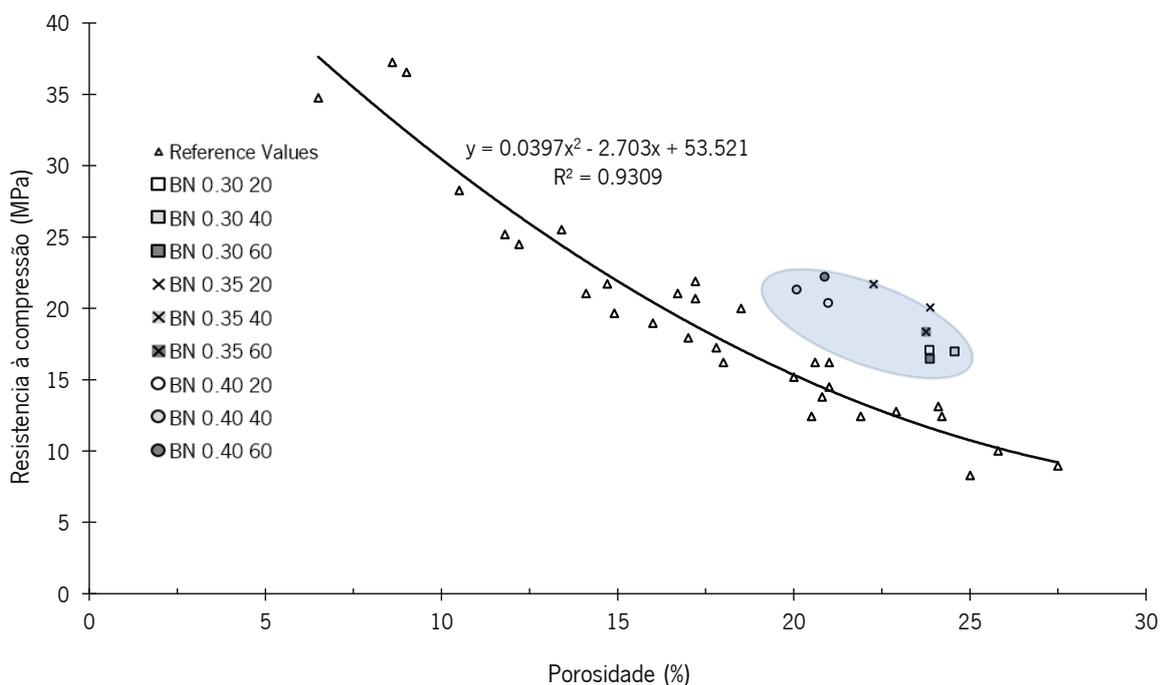


Figura 4. 23 Relação da resistência à compressão e a porosidade por imersão

Também se verificou uma redução da resistência à compressão do betão com a permeabilidade medida com o permeâmetro FH como se observa na Figura 4. 24.

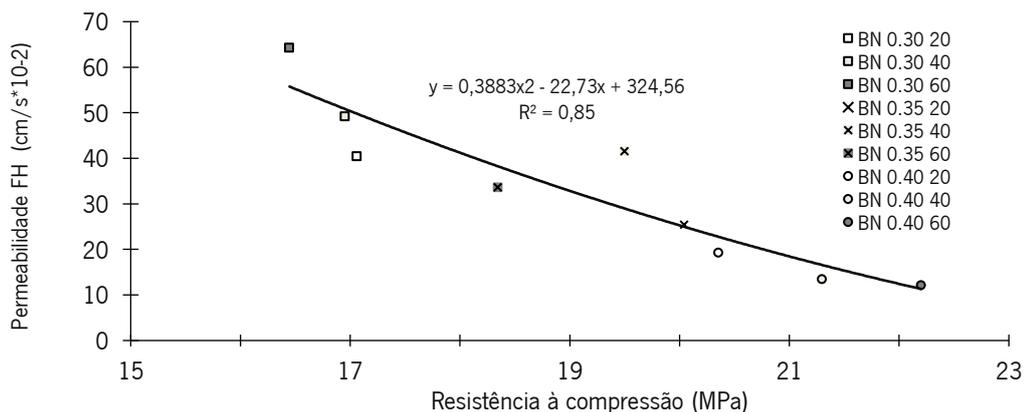


Figura 4. 24 Comparação da permeabilidade FH com a resistência da compressão dos betões com agregados naturais

4.2.7. Abrasão por cântabro

Na Figura 4. 25 e Tabela 4. 20 apresentam-se os resultados do ensaio de abrasão por cântabro em que se obtiveram valores entre 16,83 e 45,71%, valores estes que se encontram dentro da especificação para betões asfálticos.

Na Figura 4. 26 faz-se a correlação dos resultados da abrasão por cântabro com a resistência à compressão. O betão com maior relação A/C (0,40) apresentou a menor abrasão e maior resistência à compressão, sendo visível que o aumento da relação A/C produz betões com normal resistência à compressão e normal abrasão por Cântabro.

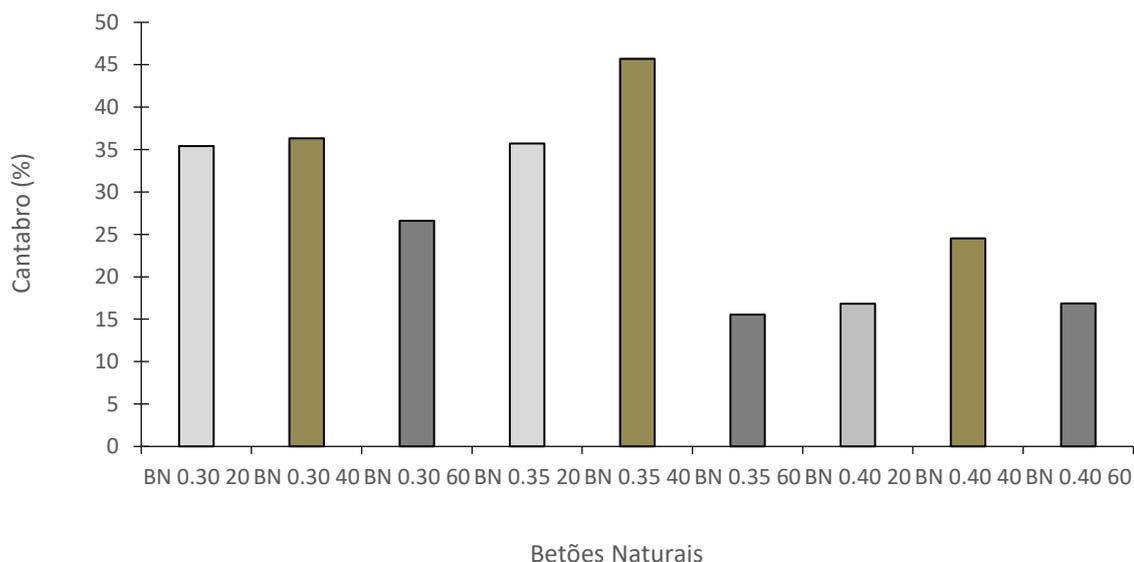


Figura 4. 25 Resultados do ensaio de abrasão por cântabro da quantidade de cimento 300 kg/m³

Tabela 4. 20 Resultados do ensaio de abrasão por cântabro da quantidade de cimento 300 kg/m³

Betões, A/C e Vibração	Massa Inicial	Massa desgasto	Massa (g)	Massa desgasto (%)	Média (%)	Desvio Padrão (K)	Coefficiente de Variação (%)
BN 300 0.30 20	942,20	731,40	210,80	22,37	1304,4%	12,54	35,4%
	922,40	439,60	482,80	52,34	-5234,2%		
	855,20	585,50	269,70	31,54	-3153,6%		
BN 300 0.30 40	921,20	553,80	367,40	39,88	-355,1%	2,73	7,5%
	935,60	600,10	335,50	35,86	-3585,9%		
	864,40	576,95	287,45	33,25	-3325,4%		
BN 300 0.30 60	852,90	669,20	183,70	21,54	505,4%	8,49	31,9%
	931,60	572,50	359,10	38,55	-3854,7%		
	953,70	765,90	187,80	19,69	-1969,2%		
BN 300 0.30 20	938,10	755,60	182,50	19,45	1626,5%	12,46	34,9%
	919,90	570,50	349,40	37,98	-3798,2%		
	860,40	432,60	427,80	49,72	-4972,1%		
BN 300 0.30 40	954,70	750,50	204,20	21,39	2432,0%	17,92	39,2%
	930,90	334,70	596,20	64,05	-6404,6%		
	910,00	439,60	470,40	51,69	-5169,2%		
BN 300 0.30 60	994,50	797,90	196,60	19,77	-420,6%	4,27	27,4%
	948,40	785,20	163,20	17,21	-1720,8%		
	876,70	791,55	85,15	9,71	-971,3%		
BN 300 0.30 20	928,10	790,30	137,80	14,85	198,4%	1,75	10,4%
	999,50	834,20	165,30	16,54	-1653,8%		
	904,30	731,50	172,80	19,11	-1910,9%		
BN 300 0.30 40	943,70	807,00	136,70	14,49	1004,8%	14,33	58,4%
	996,80	854,10	142,70	14,32	-1431,6%		
	902,90	498,40	404,50	44,80	-4480,0%		
BN 300 0.30 60	903,40	753,40	150,00	16,60	27,0%	2,56	15,2%
	978,80	842,90	135,90	13,88	-1388,4%		
	915,40	731,10	184,30	20,13	-2013,3%		

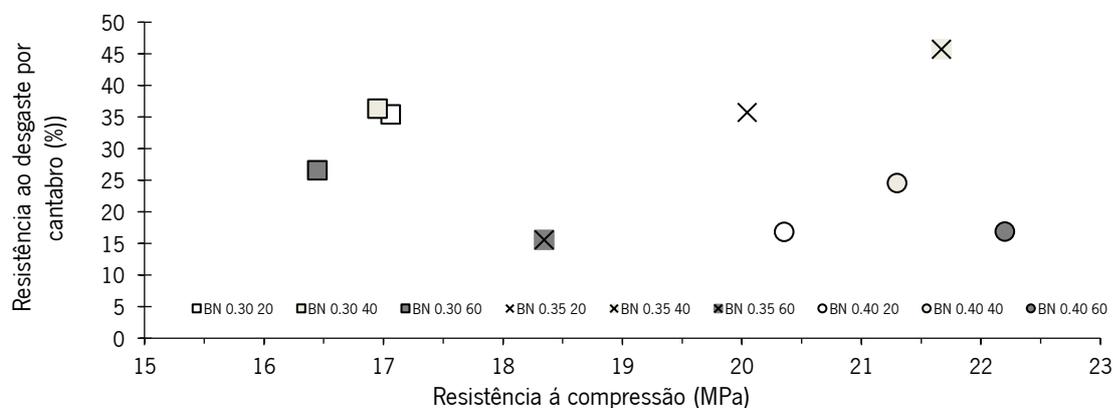


Figura 4. 26 Correlação dos resultados de abrasão por cântabro e a resistência à compressão

4.2.8. Consideração final

O desenvolvimento desta segunda fase do trabalho permitiu concluir que com o fuso granulométrico PA12.5 utilizado em betões asfálticos e com uma dosagem de cimento de 300 kg/m³ pode obter-se um betão com a permeabilidade e resistência adequada aos fins a que se destina, utilizando uma razão água cimento de 0.30 e um tempo de vibração de 40 segundos, valores estes que serão utilizados na terceira fase do trabalho para a aplicação de agregados reciclados.

4.3. CONCEÇÃO DE BETÃO DRENANTE COM AGREGADOS RECICLADOS

Nesta terceira fase do trabalho vai estudar-se um betão drenante com agregados reciclados utilizando as conclusões das duas fases anteriores, nomeadamente a utilização do fuso granulométrico PA 12,5 e 300 kg de cimento/m³ de betão, conclusões vindas da primeira fase do trabalho, e uma razão A/C de 0.30 e um tempo de vibração de 40 segundos, conclusões vindas da segunda fase do trabalho.

O betão com agregados reciclados foi formulado com três percentagens de RCD, nomeadamente 10%, 20% e 30% em substituição dos agregados naturais, tendo-se avaliado as suas propriedades através da realização de ensaios ao betão fresco e endurecido.

Para o estudo do betão com agregados reciclados foi utilizado como referência o betão correspondente, desenvolvido na fase anterior.

4.3.1. Abaixamento e vêbê

Os betões com agregados reciclados (B-RCD) obtiveram um abaixamento de 0 mm, como se mostra na Tabela 4. 21, enquanto para o ensaio de vêbê obtiveram-se valores médios entre 6.25 e 9.75.

Os ensaios realizados permitem concluir que o ensaio de abaixamento não permite analisar a trabalhabilidade do betão drenante, sendo que um dos parâmetros que afeta a sua medição é a quantidade de água livre presente na amassadura.

Na Figura 4. 27 encontram-se representados os valores do vêbê em que se verifica que a melhor trabalhabilidade ocorreu para o betão de referência e o aumento da quantidade de agregado reciclado aumenta a trabalhabilidade pela diminuição do vêbê.

Tabela 4. 21 Trabalhabilidade do betão drenante com agregado reciclado

Propriedades Unidades		Norma	Betão (BN)	Valores dos ensaios medições média		
Ensaio de Abaixamento	mm	NP EN 12350-2:2016 [59]	B-RCD	0	0	0
			BN-REF	8	8	7,5
Ensaio de Vêbê	s	NP EN 12350-3:2011 [60]	B-RCD 10%	10	10	9,75
			B-RCD 20%	9	10	8
			B-RCD 30%	7	9	6,25
			B-RCD 30%	8	8	

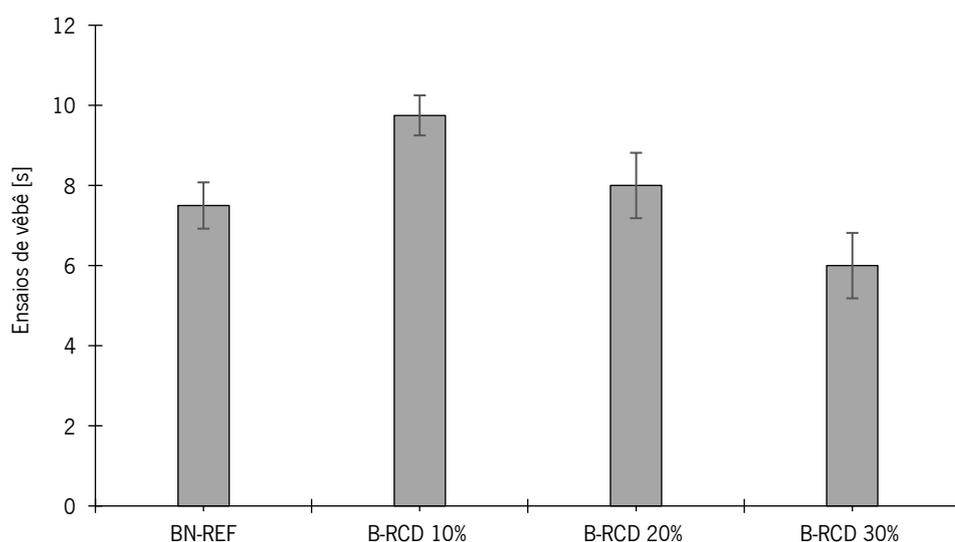


Figura 4. 27 Resultados do ensaio de vêbê com agregado reciclado

4.3.2. Massa volúmica fresca

Os resultados dos ensaios da massa volúmica fresca e o teor de ar do betão de referência (BN-REF) e dos betões com agregado reciclado (B-RCD 10%, 20% e 30%) apresentam-se na Tabela 4. 22 e representam-se na Figura 4. 28. As massas volúmicas frescas aproximam-se da classe de D2,0 da classificação da densidade do betão fresco de > 1800 e ≤ 2000 kg/m³.

Tabela 4. 22 Massa volúmica fresca do betão drenante

Propriedades (unidades)	Norma	Betões	Valores dos ensaios		
			Ensaio 1	Ensaio 2	Media
Densidades (kg/m ³)	NP EN 12350-6:2002		2078	2052	2079
		BN-REF	2081	2105	
		B-RCD	1955	1952	1973,3
		10%	2024	1962	
		B-RCD	2174	2114	2139
		20%	2108	2160	
		B-RCD	2045	2060	2044,8
		30%	2007	2067	

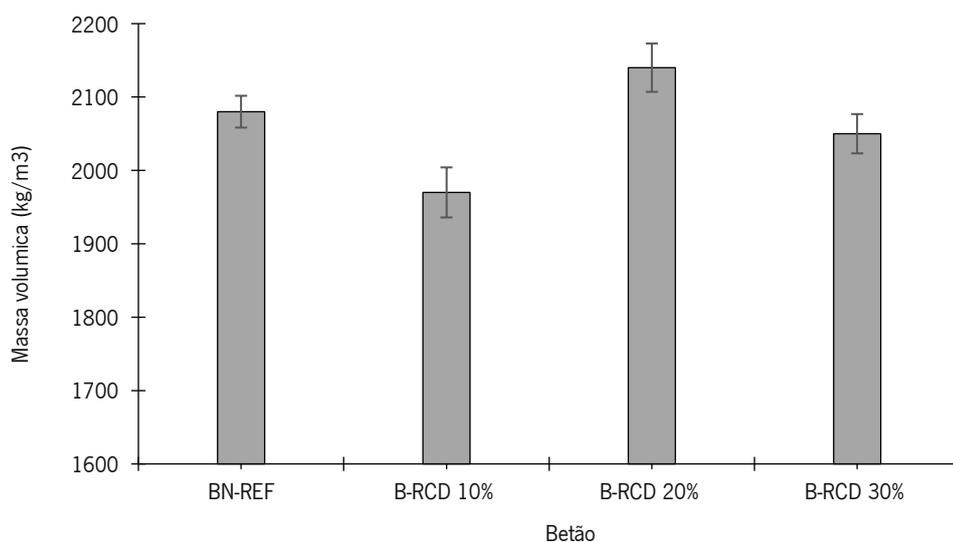


Figura 4. 28 Resultados dos ensaios da massa volúmica do betão fresco

4.3.3. Determinação do teor de ar

Na Tabela 4. 23 e Figura 4. 29 apresenta os resultados da determinação do teor de ar do betão drenante em que a média encontra-se entre 3,20 até 7,96 %. Os resultados obtidos não permitiram identificar uma relação entre a quantidade de agregado reciclado utilizado nos betões e o teor em ar. Também não é evidente o efeito do agregado reciclado comparativamente aos agregados naturais no que concerne ao teor de ar do betão.

Tabela 4. 23 Teor de ar do betão drenante

Propriedades (unidades)	Norma	Betões	Valores dos ensaios (%)		
			Ensaio 1	Ensaio 2	Media
Conteúdo de teor de ar (%)	NP EN 12350- 7:2002	BN-REF	4,52	4,44	4,53
			4,5	4,65	
		B-RCD	8,70	8,30	7,96
		10%	6,42	8,41	
		B-RCD	2,58	3,45	3,20
		20%	3,94	2,82	
		B-RCD	4,94	4,95	4,81
		30%	5,38	3,97	

NB: Vibração de 40 (s) A/C (0,30) Cimento de (300 Kg/m³)

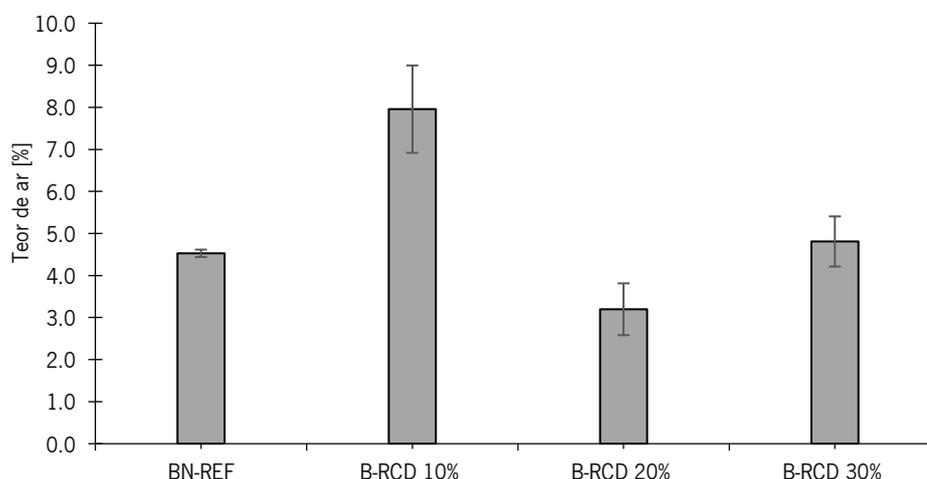


Figura 4. 29 Resultados dos ensaios de Teor de Ar

4.3.4. Permeabilidade K_{Lcs}

Os resultados obtidos no ensaio de permeabilidade com o permeâmetro LCS aos cubos são apresentados na Tabela 4. 24 e representados na Figura 4. 30, podendo verificar-se, comparativamente ao betão com agregados naturais, uma redução do coeficiente de permeabilidade (aumenta a permeabilidade) dos betões com agregados reciclados. A permeabilidade foi igual para os betões com 10% e 20% de RCD, tendo diminuído (aumentou o coeficiente) com 30% de RCD. Os valores obtidos estão dentro dos limites normais para os betões drenantes.

Tabela 4. 24 Permeabilidade K_{LCS} dos betões com agregados reciclados

Betões	Superfície por cima			Média (s)	Superfície por baixo			Média (s)	Media TTL (s)
	A (s)	B (s)	C (s)		a (s)	b (s)	c (s)		
BN - REF	31,2	20,7	29,2	27,4	46,7	28,1	15,9	30,4	28,9
	31,7	21,1	30,5		47,2	28,4	16,2		
B-RCD 10%	22,5	10,8	16,2	16,3	32,1	20,1	16,4	23,6	19,9
	21,4	10,4	16,4		35	21,9	15,9		
B-RCD 20%	11,7	13,9	34,5	20,0	24,1	19,4	13,1	19,1	19,6
	11,8	14,1	34,1		24,3	20,3	13,6		
B-RCD 30%	33,7	15,2	38,1	29,3	42,4	20,1	52,1	38,6	34,0
	34,3	15,9	38,8		42,8	20,7	53,5		

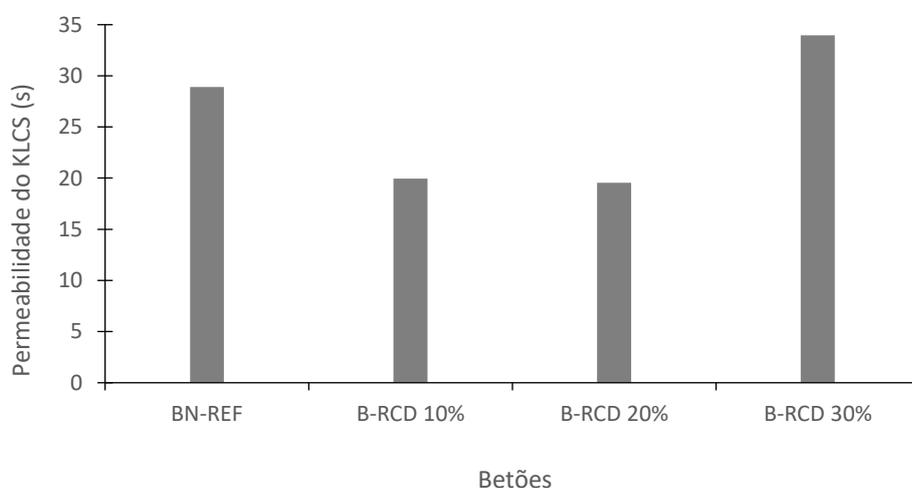


Figura 4. 30 Coeficiente da permeabilidade K_{LCS} dos betões com agregados reciclados

Os resultados da permeabilidade LCS das lajes são apresentados na Tabela 4. 25 e Figura 4. 31, variando entre os 10 e os 35 segundos, tendo-se verificado que a permeabilidade dos betões diminui com a incorporação de agregados reciclados devido à maior absorção de água destes. O aumento da taxa de RCD fez diminuir a permeabilidade do betão drenante.

Tabela 4. 25 Resultado dos ensaios de permeabilidade de lajes

Betões	K_{LCS} (mm/s)	Desvio padrão (k)	Coefficiente de variação (%)
BN - REF	12,94	0,14	1,5%
B-RCD 10 %	10,37	0,12	1,5%
B-RCD 20 %	4,62	0,03	0,7%
B-RCD 30 %	4,81	0,06	1,3%

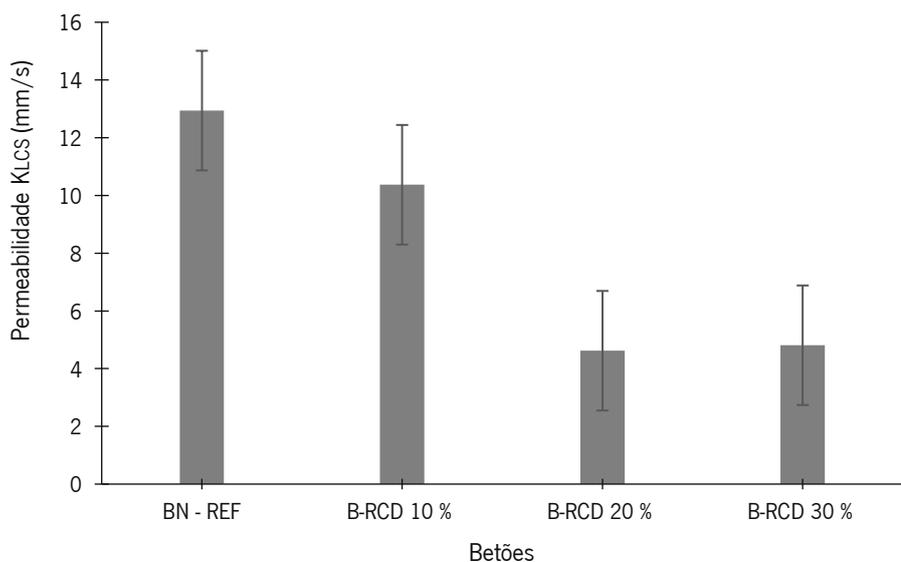


Figura 4. 31 Resultados dos ensaios de permeabilidade de lajes

4.3.5. Permeabilidade K_{FH}

A permeabilidade K_{FH} dos betões com agregados reciclados apresentam-se na Tabela 4. 26 e representam-se na Figura 4. 32, verificando-se que permeabilidades de 22,95 a 49,19 $\text{cm/s} \cdot 10^{-2}$, que compara com 38,92 $\text{cm/s} \cdot 10^{-2}$ do betão de referência com agregados naturais. Com os resultados obtidos é possível concluir que os betões com agregado reciclados apresentam menor permeabilidade devido à sua maior absorção de água, sendo que a permeabilidade diminui com o aumento da quantidade de RCD.

Tabela 4. 26 Permeabilidade vertical K_{FH}

Betões	Média da Permeabilidade vertical ($\text{cm/s} \cdot 10^{-2}$)	Desvio padrão	Coefficiente de variação
BN - REF	38,92	0,25	0,65%
B-RCD 10 %	49,19	9,26	18,82%
B-RCD 20 %	27,06	3,68	13,61%
B-RCD 30 %	22,95	3,60	15,67%

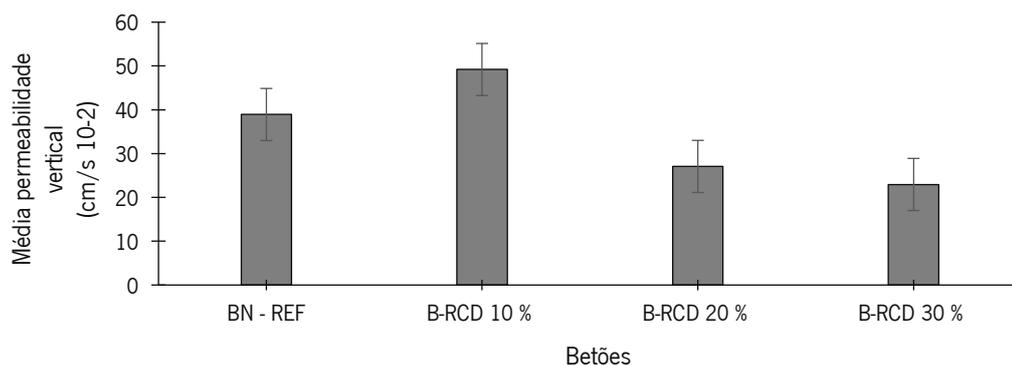


Figura 4. 32 Média da permeabilidade K_{FH}

4.3.6. Absorção de água por imersão

Através das Tabelas 4. 28 e 4. 29 e Figura 4. 33 pode analisar-se de uma forma compreensível a massa volúmica aparente e a absorção de água por imersão (volume de vazios) dos diferentes provetes dos betões drenantes com agregado reciclado.

Em termos de massa volúmica, verifica-se que o aumento da percentagem de RCD provoca um aumento da massa volúmica aparente, não atingindo o valor do betão de referência. Quanto ao volume de vazios, parece que este diminui com o aumento da taxa de RCD, sendo em todos os casos igual ou superior ao obtido no betão de referência.

Tabela 4. 27 Massa volúmica aparente dos betões com agregados reciclados

vigas	Altura (cm) Média	Largura (cm) Média	comprimento (cm)	Massa do provete (g)	Volume (cm ³)	Baridade Aparente (g/cm ³)	Média da baridade aparente (g/cm ³)
BN-REF.1	5,12	6,45	38,30	2593,20	1263,34	2,053	
BN-REF.2	5,35	6,35	38,30	2601,70	1301,96	1,998	2052,2
BN-REF.3	5,15	6,38	38,30	2646,70	1256,95	2,106	
B-RCD 10%.1	5,21	6,37	38,30	2413,00	1269,61	1,901	
10%. 2	5,09	6,45	38,30	2479,20	1258,88	1,969	1954,6
10%.3	5,04	6,45	38,30	2482,30	1245,06	1,994	
B-RCD 20%.1	5,07	6,38	38,40	2449,60	1242,93	1,971	
20%.2	5,17	6,46	38,40	2499,20	1283,98	1,946	1977,3
20%.3	5,15	6,36	38,40	2535,70	1258,57	2,015	
B-RCD 30%.1	5,17	6,40	38,30	2546,40	1267,43	2,009	
30%.2	5,16	6,49	38,30	2506,10	1283,43	1,953	1992,8
30%.3	5,12	6,38	38,30	2526,10	1252,56	2,017	

Tabela 4. 28 Volume de vazios do betão com agregados reciclados endurecido por imersão de 28 dias

Betões	M1	M2	M3	B1	B2	B3	B4	Volume de vazios (%)
BN - REF	852,0	514,00	819,00	2685,25	2520,71	2423,08	4,03	18,59%
B-RCD 10 %	944,0	567,00	906,00	2672,57	2503,98	2403,18	4,19	21,94%
B-RCD 20 %	804,0	473,00	758,00	2659,65	2429,00	2290,03	6,07	18,59%
B-RCD 30 %	831,0	495,00	791,00	2672,30	2473,21	2354,17	5,06	19,42%

Onde: M1 - Massa saturado não imerso; M2 - Massa saturado imerso; M3 - Massa seca B1- Massa volúmica do material impermeável das partículas (g); B2- Massa volúmica das partículas secas (g); B3 - Massa volúmica das partículas saturadas (g); B4 - Absorção de água (%).

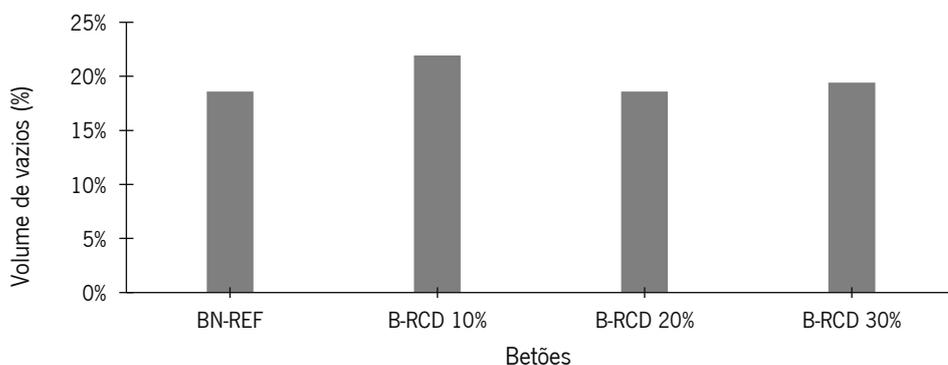


Figura 4. 33 Absorção da água por imersão de 28 dias

4.3.7. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com NP EN 772 – 11 de 2002 [72] em provetes com 100x100x100 mm³, apresentando-se na Tabela 4. 29 e na Figura 4. 34 os resultados obtidos.

Tabela 4. 29 Determinação da absorção da água por capilaridade

Betões	Absorção de água por capilaridade (kg/m ²)
BN - REF	0,3919
B-RCD 10 %	0,247
B-RCD 20 %	0,3529
B-RCD 30 %	0,3692

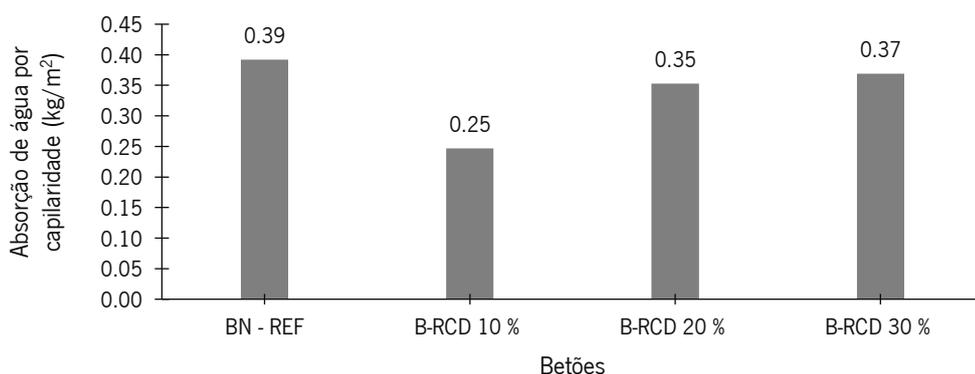


Figura 4. 34 Absorção da água por capilaridade

Os resultados obtidos permitem verificar um aumento da absorção de água por capilaridade com a incorporação de agregados reciclados, devido à presença de poros de menores dimensões. Portanto, quanto maior a taxa de incorporação de RCD maior os poros e conseqüentemente maior a absorção de água por capilaridade.

A evolução da absorção de água com o tempo está representada na Figura 4. 35, sendo visível que a absorção acontece no início do contacto com a água, progredindo a um ritmo cada vez menor ao longo do tempo.

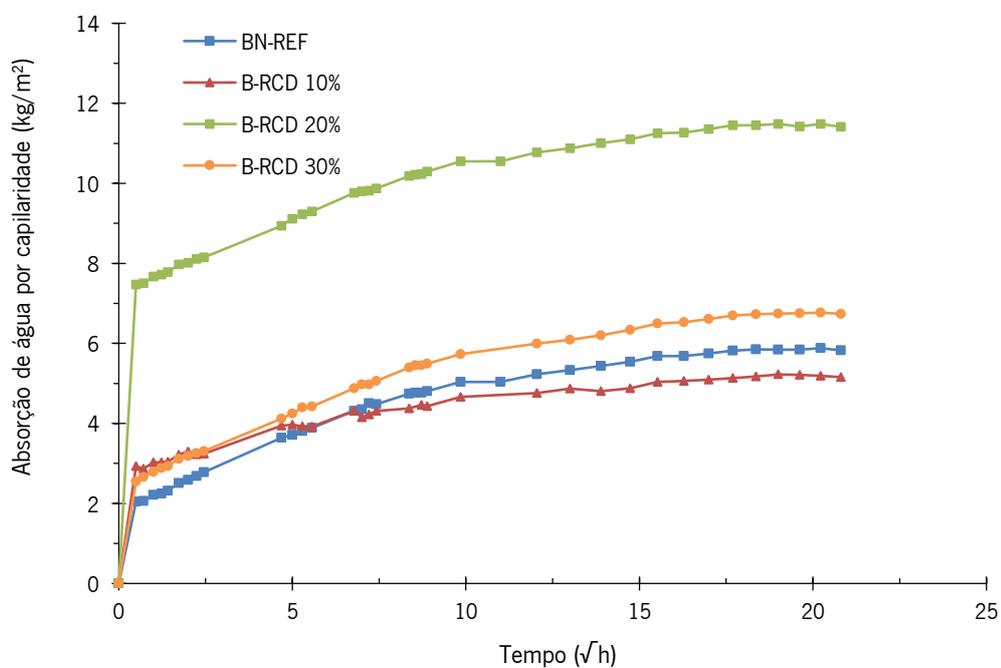
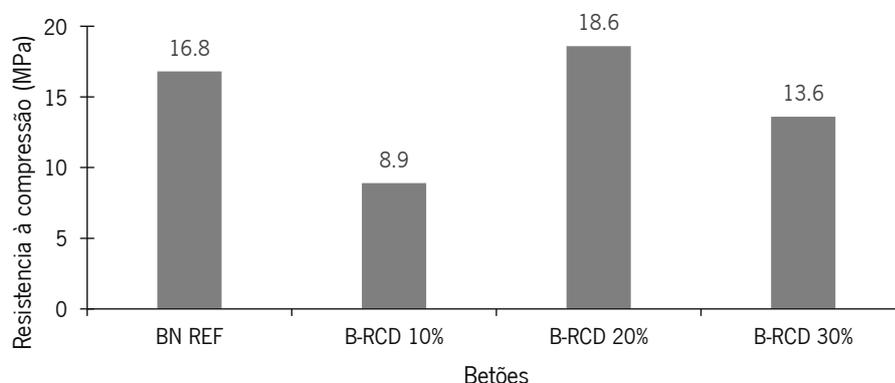


Figura 4. 35 Absorção da água por capilaridade

4.3.8. Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos betões com agregados reciclados são apresentados na Tabela 4. 30, tendo-se medido a resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias.



Na

Figura 4. 36 apresenta-se a resistência à compressão aos 28 dias a qual varia para os betões com RCD entre os 8,9 e os 18,6 MPa, não sendo clara a influência do agregado reciclado. Além disto, a presença dos agregados reciclados fez a resistência à compressão diminuir face ao betão de referência para a incorporação de 10 e 30% de RCD. Apenas para 20% é que foi verificado um aumento da resistência à compressão.

Tabela 4. 30 Resultados dos ensaios da resistência à compressão dos betões de B-RCD

Betões	Massa do Provete (kg/m ³)	Resistência à Compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
B-RCD 10% 7d	1760,62	5,35	1,48	28%
B-RCD 10% 14d	1751,74	7,15	1,90	27%
B-RCD 10% 28d	1843,47	8,90	3,54	40%
B-RCD 20% 7d	1947,03	14,62	2,11	14%
B-RCD 20% 14d	1947,03	15,44	1,18	8%
B-RCD 20% 28d	2021,01	18,62	1,81	10%
B-RCD 30% 7d	1864,18	11,79	1,11	9%
B-RCD 30% 14d	1941,12	16,70	1,31	8%
B-RCD 30% 28d	1896,73	13,59	1,79	13%

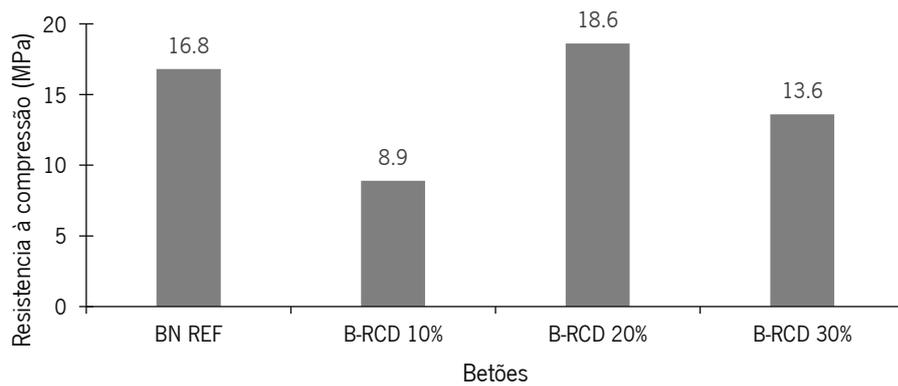


Figura 4. 36 Resultado do ensaio da resistência à compressão com B-RCD dos 28 dias de idade

4.3.9. Resistência à tração

Os ensaios de resistência à tração aos 28 dias conduziram aos valores indicados na Tabela 4. 31 e representados na Figura 4. 37, apresentando valores entre 1,48 até 2,07 MPa. Há uma tendência para aumento da resistência à tração com a taxa de incorporação de agregados reciclados devido à diminuição da porosidade. Comparativamente ao betão com agregados naturais, os betões com RCD apresentaram maior resistência à tração.

Tabela 4. 31 Resistência à tração dos betões com agregados reciclados

Betões	Resistência à tração aos 28d (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
BN - REF	1,48	0,10	0,07
B-RCD 10 %	1,64	0,39	0,24
B-RCD 20 %	2,07	0,26	0,12
B-RCD 30 %	1,99	0,16	0,08

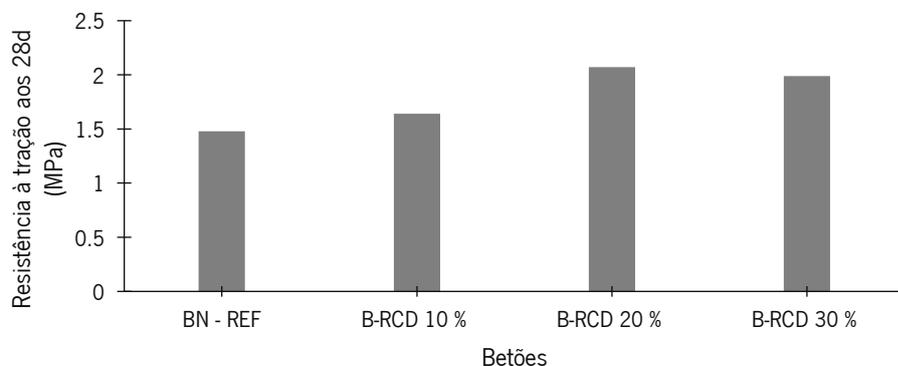


Figura 4. 37 Resistência à tração dos betões com agregados reciclados

4.3.10. Resistência à flexão

Nos ensaios da resistência à flexão foram ensaiados provetes prismáticos com 100 x 100 x 400 mm³ em conformidade com a norma EN 12390-1, tendo-se avaliado a resistência à flexão aos 7, 14 e 28 dias. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4. 32, variando entre 1,75 e 4,3 MPa, estando representados na Figura 4. 38.

A presença de agregados reciclados no betão parece mostrar que conduz a uma redução da resistência à flexão do betão comparativamente ao betão de referência. Além disto, verifica-se que a resistência à flexão aumentou com o aumento da percentagem de agregados reciclados e com o tempo de cura.

Tabela 4. 32 Resistência à flexão dos betões com agregado reciclado

Betões	Provete 28 dias	Resistência à Flexão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
BN - REF-7d		3,31	0,16	4,9%
BN - REF-14d		3,05	0,25	8,3%
BN - REF-28d	BN-REF	4,33	0,17	4,0%
B-RCD 10 % 7d		1,75	0,07	3,9%
B-RCD 10 % 14d		2,15	0,25	11,7%
B-RCD 10 % 28d	10% RCD	2,13	0,26	12,2%
B-RCD 20% 7d		2,37	0,21	8,7%
B-RCD 20% 14d		3,18	0,15	4,7%
B-RCD 20% 28d	20% RCD	3,73	0,32	8,5%
B-RCD 30 % 7d		2,60	0,07	2,8%
B-RCD 30 % 14d		2,97	0,00	0,0%
B-RCD 30 % 28d	30% RCD	3,64	0,38	10,4%

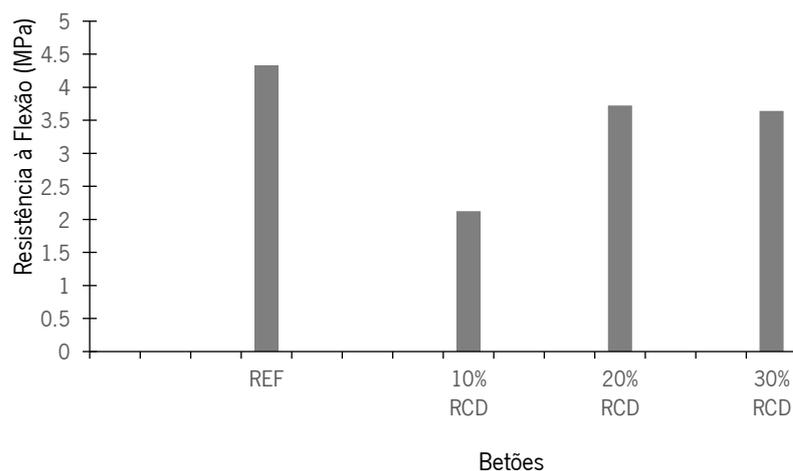


Figura 4. 38 Resultados dos ensaios de flexão de 28 dias

4.3.11. Desgaste por cântabro

A avaliação do desgaste dos betões com agregados reciclados foi realizada através do ensaio de cântabro tendo-se obtido os resultados indicados na Tabela 4. 33 e representados na Figura 4. 39.

A perda de massa, ou o cântabro, dos betões com agregados reciclados encontra-se entre 17,77% e 40,85%, comparativamente aos 57,87% para o caso do betão de referência com agregados naturais. Também parece evidente que o aumento da quantidade de agregado reciclado conduziu a menor perda por desgaste, simulando a desagregação do betão devido à passagem do tráfego.

Tabela 4. 33 Perda da massa dos betões com agregado reciclado no ensaio de cântabro

Betões	Cântabro (%)	Desvio padrão (%)	Coeficiente de variação
BN-REF	57,87	6,18	10,67%
B-RCD 10 %	40,85	3,92	9,59%
B-RCD 20 %	17,77	2,07	11,66%
B-RCD 30 %	19,42	2,14	10,99%

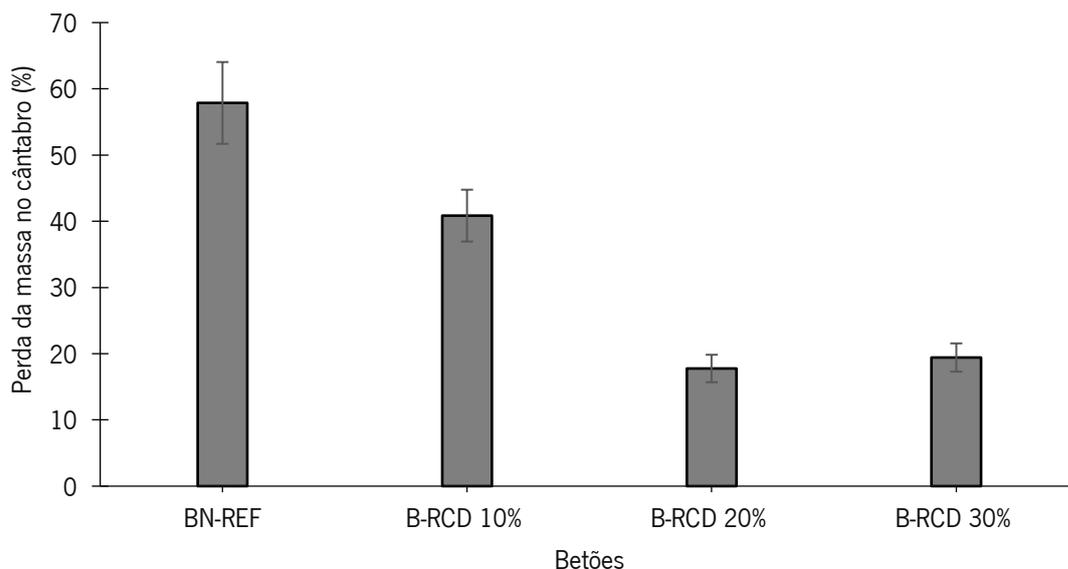


Figura 4. 39 Resultado da perda da massa por cântabro

4.3.12. Resistências ao sulfato magnésio

Os betões com agregados reciclados foram submetidos ao ensaio das propriedades térmicas e de meteorização dos agregados parte 2 com sulfato de magnésio (NP EN 1367-2 2002) [31] de modo a avaliar as degradações provocadas pelos efeitos destrutivos.

Neste ensaio é avaliado o comportamento do provete quando submetido à ação cíclica constituída por imersão em sulfato magnésio durante 24 horas, seguida de lavagem e secagem.

Após 25 ciclos, os provetes degradaram-se e perderam entre 1,7% até 21% da sua massa como se mostra na Tabela 4. 34 e na Figura 4. 40. Os provetes que apresentaram maior resistências (menor perda da massa) foram os do betão de referência devido ao tipo de agregados com menor porosidade e maior resistência mecânica. Não foi evidente o efeito da taxa de incorporação de agregados reciclados na resistência ao sulfato magnésio.

Tabela 4. 34 Resistência ao sulfato magnésio aos 15, 20 e 25 ciclos

Betões	Massa C.	Cálculo de 15		Cálculo de 20		Cálculo de 25		Betões (%)
		ciclos		ciclos		ciclos		
BN-REF	415,7	422,0	-1,5	413,8	0,5	405,3	2,5	1,7
	477,5	481,9	-0,9	473,7	0,8	466,6	2,3	
	471,3	478,0	-1,4	473,4	-0,4	465,8	1,2	
	410,1	416,7	-1,6	411,3	-0,3	406,7	0,8	
B-RCD 10 %	325,6	327,3	-0,5	303,2	6,9	262,8	19,3	16,4
	377,6	378,7	-0,3	357,6	5,3	300,7	20,4	
	398,5	398,1	0,1	365,6	8,3	294,6	26,1	
	376,0	378,1	-0,6	356,4	5,2	308,4	18,0	
B-RCD 20 %	407,2	414,8	-1,9	395	3,0	374,7	8,0	5,0
	347,8	353,3	-1,6	339,5	2,4	323,4	7,0	
	414,3	422,1	-1,9	413,1	0,3	394,2	4,9	
	388,9	396,7	-2,0	390,3	-0,4	368,2	5,3	
B-RCD 30 %	341,9	347,3	-1,6	338,8	0,9	301,5	11,8	8,7
	417,4	424,2	-1,6	414,8	0,6	337,1	19,2	
	428,4	436,3	-1,8	423,4	1,2	411,5	3,9	
	532,7	542,6	-1,9	530,7	0,4	521,3	2,1	

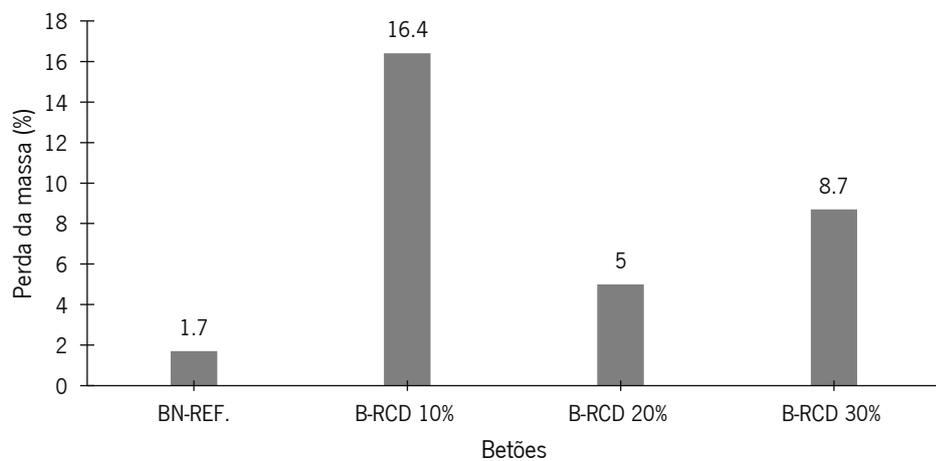


Figura 4. 40 Resistência ao sulfato magnésio após 25 ciclos

4.3.13. Módulo de elasticidade

Os ensaios do módulo de elasticidade em compressão conduziram aos valores indicados na Tabela 4.35 e representados na Figura 4.41, apresentando valores entre 4.42 e 14.30 GPa. O valor de 4.42 GPa foi obtido para o betão com 10% de agregado reciclado e evidencia algum problema no betão pelo que não deverá ser considerado para análise comparativa entre os betões com agregados reciclados e também com o betão de referência.

Assim, pode dizer-se que o módulo de elasticidade dos betões com agregado reciclado é semelhante ao do betão de referência com agregados naturais e parece não haver diferença significativa de módulo para as diferentes taxas de incorporação de agregado reciclado.

Tabela 4.35 Módulo de elasticidade dos betões com agregados reciclados

Betões	Incorporação de RCD (%)	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coefficiente de variação (%)
BN-REF	0	14,10	4,39	0,31
B-RCD 10 %	10	4,42	1,05	0,24
B-RCD 20 %	20	13,26	3,64	0,27
B-RCD 30 %	30	14,30	3,06	0,21

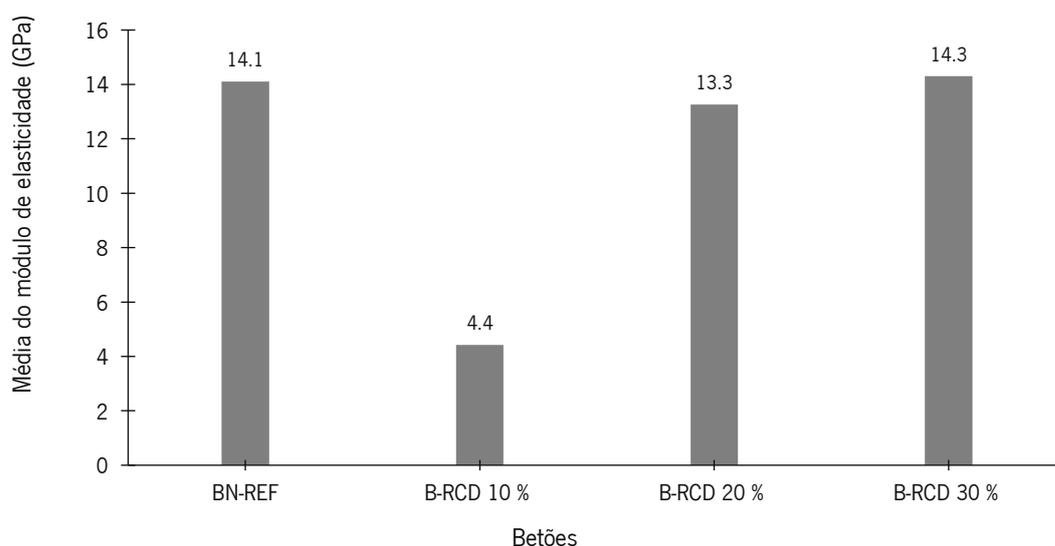


Figura 4.41 Módulo de elasticidade dos betões com agregados reciclados

4.3.14. Gelo/degelo

Os resultados do ensaio de gelo/degelo são apresentados na Tabela 4. 36, representando-se os valores da perda de massa na Figura 4. 42. Como se observa nesta tabela, a perda da massa começou aos 58 ciclos.

Os resultados obtidos mostram que o betão com agregados reciclados apresenta um comportamento melhor que o betão com agregados naturais com exceção do betão com 30% de incorporação a partir dos 82 ciclos. Também se verifica que o aumento da taxa de incorporação de agregado reciclado faz aumentar a perda por gelo/degelo.

Na Figura 4. 43 mostra-se o aspeto dos provetes no ensaio de gelo/degelo após 70 e 82 ciclos onde é visível o desgaste do material.

Tabela 4. 36 Perda da massa (%) no ensaio de gelo/degelo

Betões	34 ciclos	46 ciclos	58 ciclos	70 ciclos	82 ciclos	94 ciclos
BN-REF	0,32	1,10	2,45	35,4	51,1	85,2
B-RCD 10 %	0,25	1,25	1,47	1,7	2,2	2,6
B-RCD 20 %	0,65	1,10	1,56	5,0	10,3	45,5
B-RCD 30 %	0,25	0,70	1,80	17,9	63,2	100,0

NB: Um ciclo é 12 h. Um dia 2 ciclos

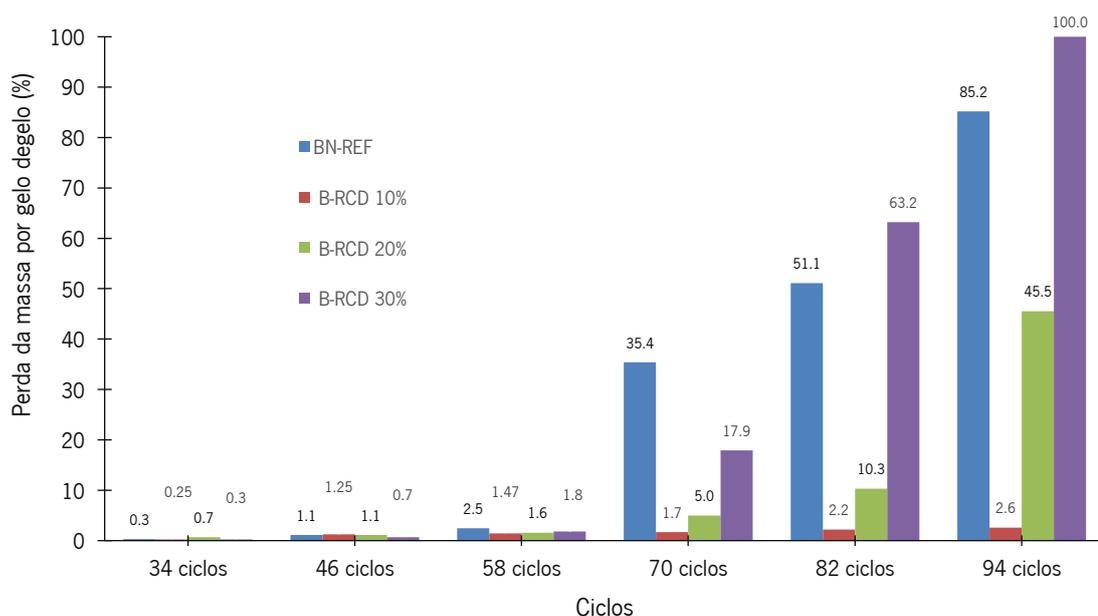


Figura 4. 42 Perda da massa no ensaio de gelo/degelo

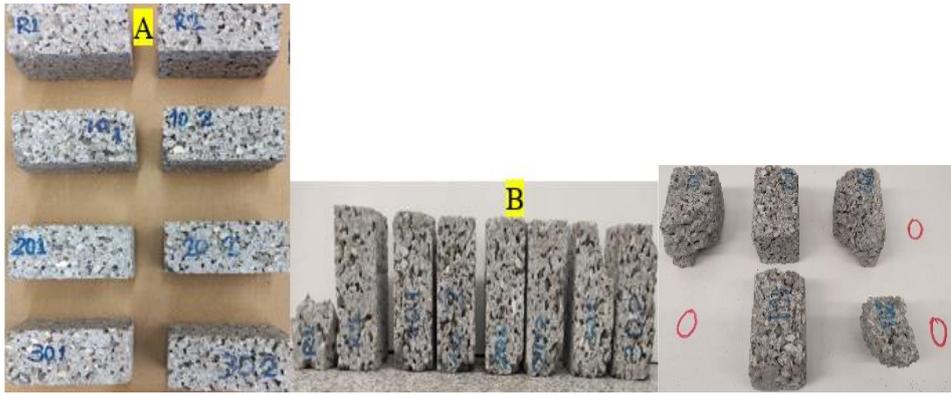


Figura 4. 43 Aspeto dos provetes do ensaio de gelo/degelo: No início do ensaio (A); no ciclo 70 (B); no ciclo 82

4.3.15. Volume vazios do betão drenante

O volume de vazios dos betões drenantes avaliado segundo a norma NP 581 encontra-se na Figura 4. 44, tendo-se obtido valores entre 18,59% a 21,94% com base na massa volúmica do material impermeável das partículas e a baridade aparente. Como se pode verificar, não existe diferença significativa de volume de vazios entre os vários betões com agregados reciclados e destes com o betão com agregado natural.

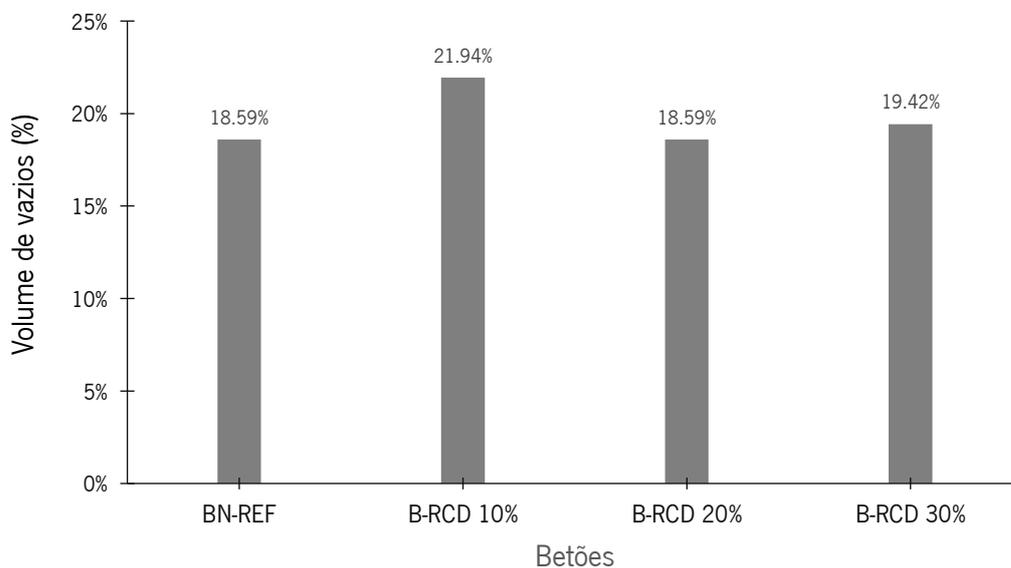


Figura 4. 44 Volume vazios dos betões com agregados reciclados

4.3.16. Profundidade média da textura

A textura do betão foi avaliada pelo método da mancha de areia em lajetas de 40 x 40 x 8 cm³, conforme se observa na Figura 4. 45 para o betão de referência (A), e para os betões com 10%, 20% e 30% de agregado reciclado, respetivamente com as referências (B), (C) e (D).



Figura 4. 45 Ensaio de mancha de areia

As medições da mancha de areia, nomeadamente o seu diâmetro médio, permitiu obter a profundidade média da textura (PMT) que se representa na Figura 4. 46. Os resultados obtidos permitem concluir que a textura dos betões, tanto com agregado reciclado como com agregado natural é muito grossa por apresentar uma profundidade média da textura superior a 1.2 mm, de acordo com o caderno de encargos da Infraestruturas de Portugal (IP) (EP, 2014).

Os resultados obtidos permitiram concluir que a introdução de agregado reciclado aumenta a textura do betão comparativamente ao betão com agregado natural. Quanto ao betão com agregado reciclado, o aumento da taxa deste agregado fez aumentar a textura do betão. Esta ligeira alteração poderá estar relacionada com a diminuição do volume de vazios obtido.

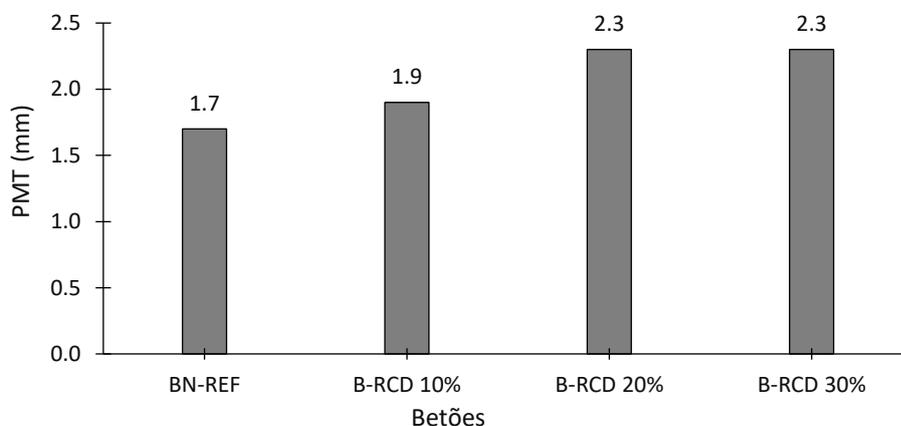


Figura 4. 46 Profundidade média da textura dos betões com agregado reciclado

4.3.17. Resistência ao deslizamento

A resistência ao deslizamento foi avaliada através do método do pêndulo britânico às lajetas de 40 x 40 x 8 cm³ já utilizadas para determinação da profundidade média da textura. As lajetas utilizadas neste ensaio foram produzidas em laboratório não tendo sofrido qualquer desgaste pela circulação do tráfego e foram ensaiadas nas mesmas condições.

Os resultados obtidos no ensaio pelo método do pêndulo britânico são mostrados na Tabela 4. 37 e representados na Figura 4. 47, apresentando uma homogeneidade nos resultados para os vários betões, expressa por valores de PTV (pendulum test value) entre 73 e 78, valores muito superiores a 60, valor mínimo especificado no caderno de encargos da Infraestruturas de Portugal.

Além disto, os valores do PTV dos betões com agregados reciclados são menores que do betão com agregados naturais, verificando-se que o aumento da taxa de incorporação de agregado reciclado reduziu o PTV, ou seja, reduziu a resistência ao deslizamento.

Tabela 4. 37 Pendulum test value (PTV) dos betões com agregado reciclado

betões	PTV	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
BN-REF	78	0,55	0,71%
B-RCD 10 %	78	0,00	0,00%
B-RCD 20 %	76	0,55	0,72%
B-RCD 30 %	73	0,45	0,61%

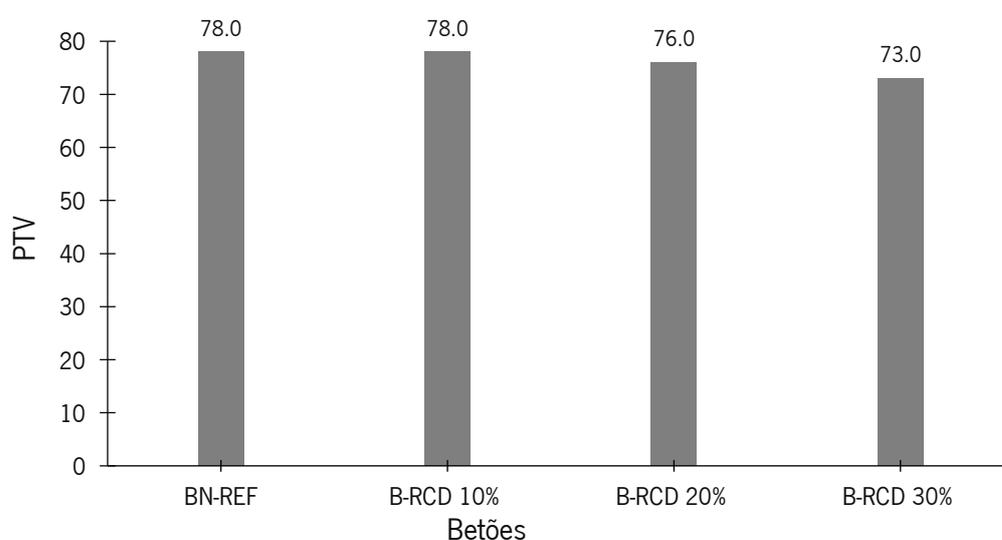


Figura 4. 47 Pendulum test value (PTV) dos betões com agregado reciclado

4.3.18. Textura da superfície do betão

A textura dos betões foi também obtida através de medição laser da superfície das lajetas, tendo-se obtido as representações 3D apresentadas no lado esquerdo das Figuras 4. 48 até 4. 51 com as quais foi possível obter a profundidade da textura representada no lado direito destas mesmas figuras.

Estas medições foram realizadas para os três betões com agregado reciclado e para o betão de referência com agregado natural.

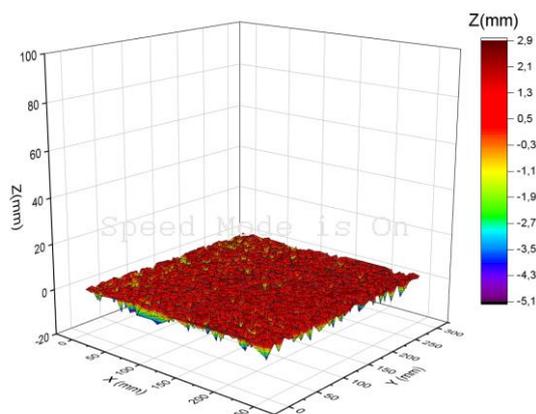


Figura 4. 48 Textura medida a laser do betão com agregados naturais

Para a profundidade média do perfil (PMP) da referência o valor do software de 3D está entre 2,9 até - 5,1 mm e o software de 2D é -5,1 mm (Figura 4. 48).

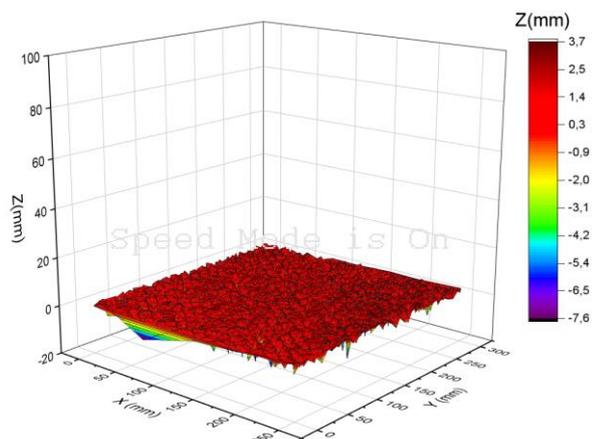


Figura 4. 49 Textura medida a laser do betão com 10% de agregados reciclados

Quanto à profundidade da laje de B-RCD 10% o valor do software 3D está entre 3,7 até -7,6 mm e o software de 2D é de -7,6 mm (Figura 4. 49) devido ao aumento de B-RCD 10%.

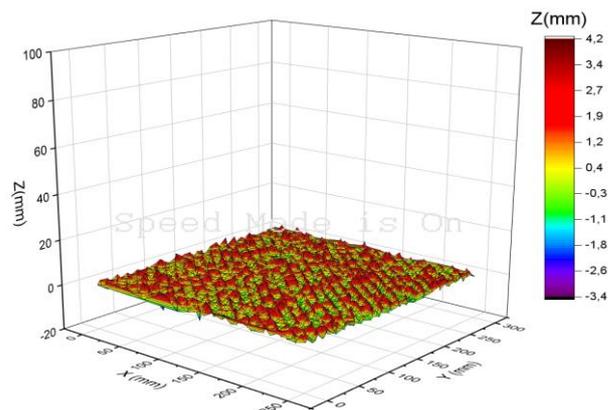


Figura 4. 50 Textura medida a laser do betão com 20% de agregados reciclados

Para os betões de B-RCD 20% o software de 3D está entre 4,2 até -3,4 mm e o software de 2D é de -3,4 mm (Figura 4. 50) devido ao aumento de RCD.

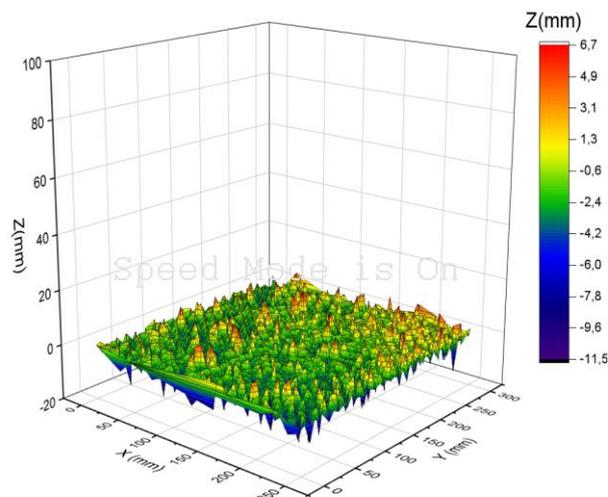


Figura 4. 51 Textura medida a laser do betão com 30% de agregados reciclados

Para o ensaio do betão de B-RCD 30%, o software de 3D está entre 6,7 até -11,5 e o 2D é de -11,5 (Figura 4. 51) devido do aumento de 30% RCD.

A média geral da profundidade média do perfil (PMP) de B-RCD, o software de 3D é de entre 2,9 até -11,5 mm, assim também a média de PMP de B-RCD de software 2D, é de -11,5 mm e apresenta nas Figuras de 4. 48 a 4.51. A profundidade média do perfil (PMP) aumenta, devido a menos agregados finos e a textura tem a tendência para aumentar com a incorporação do agregado reciclado.

4.3.19. Módulo dinâmico

Antes do ensaio de fadiga realizam-se os ensaios de módulo dinâmico às frequências de 0,1 a 10 Hz tendo-se obtido os módulos indicados na Tabela 4. 38 e representados na Figura 4. 52.

Os resultados obtidos permitem concluir que os betões com agregados reciclados apresentaram módulo dinâmico inferior ao betão com agregados naturais. Além disto, o módulo aumentou com a taxa de incorporação de agregado reciclado. Também se verificou que o módulo dinâmico apresenta valores relativamente semelhantes aos obtidos para o módulo de elasticidade.

Como era de esperar, o módulo dinâmico do betão não foi influenciado pela frequência de aplicação da carga, mostrando o comportamento elástico do betão. Isto é demonstrado pela não variação do módulo com a frequência (Figura 4. 53), mas também com os valores nulos do ângulo de fase entre a deformação e a tensão (Tabela 4. 39 e na Figura 4. 53).

Tabela 4. 38 Módulo dinâmico dos betões com agregados reciclados

	Módulo dinâmico (MPa)			
	BN-REF.	B-RCD 10%	B-RCD 20%	B-RCD 30%
0,1	15393	12724	14156	14570
0,2	15438	12755	14204	14626
0,5	15529	12848	14294	14717
1	15639	12885	14354	14796
2	15668	12925	14399	14824
5	15722	12952	14439	14898
8	15710	12956	14408	14868
10	15676	12931	14383	14840

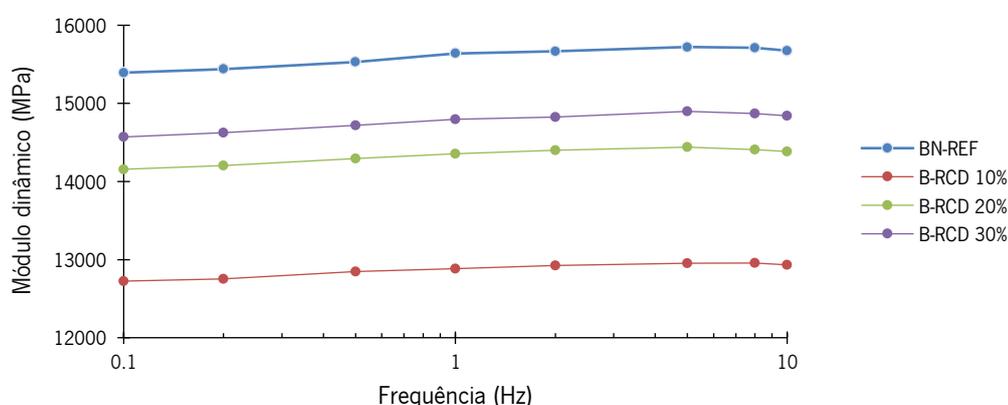


Figura 4. 52 Módulo dinâmico dos betões com agregados reciclados

Tabela 4. 39 Ângulo de fase dos betões com agregados reciclados

		Ângulo de fase			
		BN-REF.	B-RCD 10%	B-RCD 20%	B-RCD 30%
Frequência (HZ)	0,1	1,0	0,9	0,8	0,8
	0,2	0,9	0,9	0,8	0,9
	0,5	0,9	0,8	0,8	0,9
	1	0,8	0,8	0,8	0,9
	2	0,6	0,6	0,6	0,6
	5	0,2	0,1	0,1	0,1
	8	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4
	10	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7

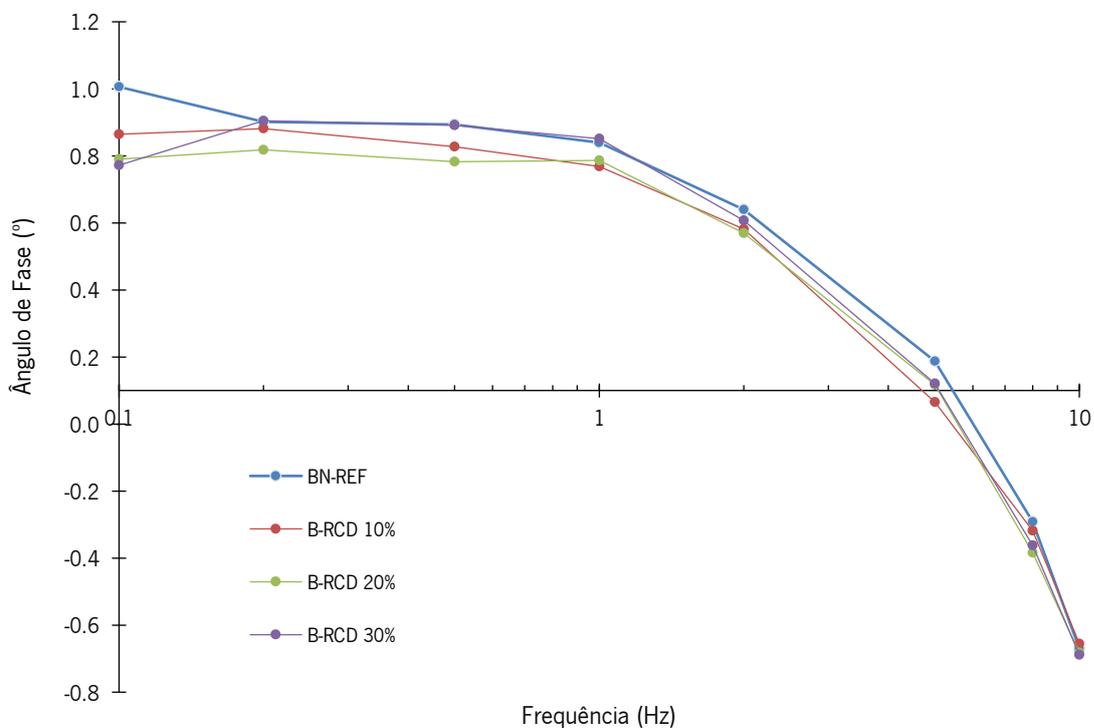


Figura 4. 53 Ângulo de fase dos betões com agregados reciclados

4.3.20. Resistência à fadiga

Para avaliação da resistência à fadiga do betão de cimento drenante fizeram-se simulações com o software JPav de dimensionamento de pavimentos para o caso de um pavimento com uma camada com 20 cm de betão drenante sobre uma camada de base também com 20 cm de espessura. Nestas simulações considerou-se que o betão de cimento tem um módulo de elasticidade médio de 10 000

MPa enquanto para a camada de base considerou-se um módulo de 1000 MPa. Estas simulações foram realizadas para três fundações com módulo de 60, 80 e 100 MPa, tendo-se obtido os resultados indicados nas figuras seguintes.

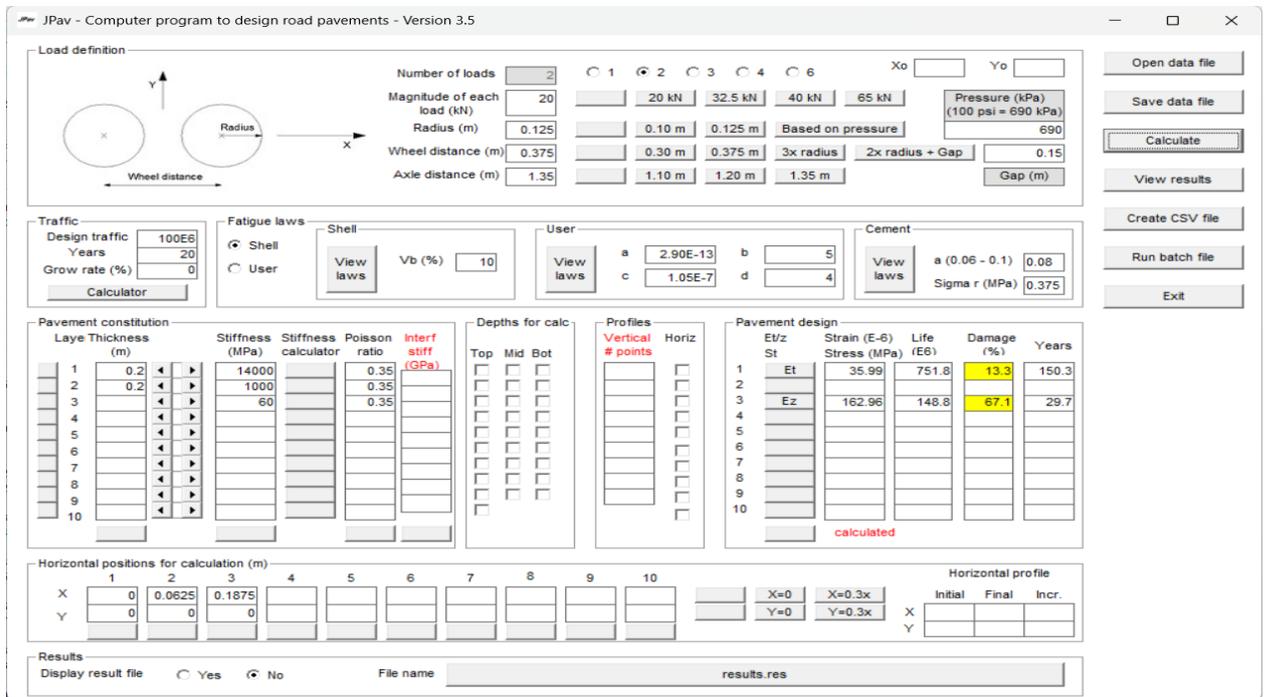


Figura 4. 54 Fundações com módulo de 60 MPa

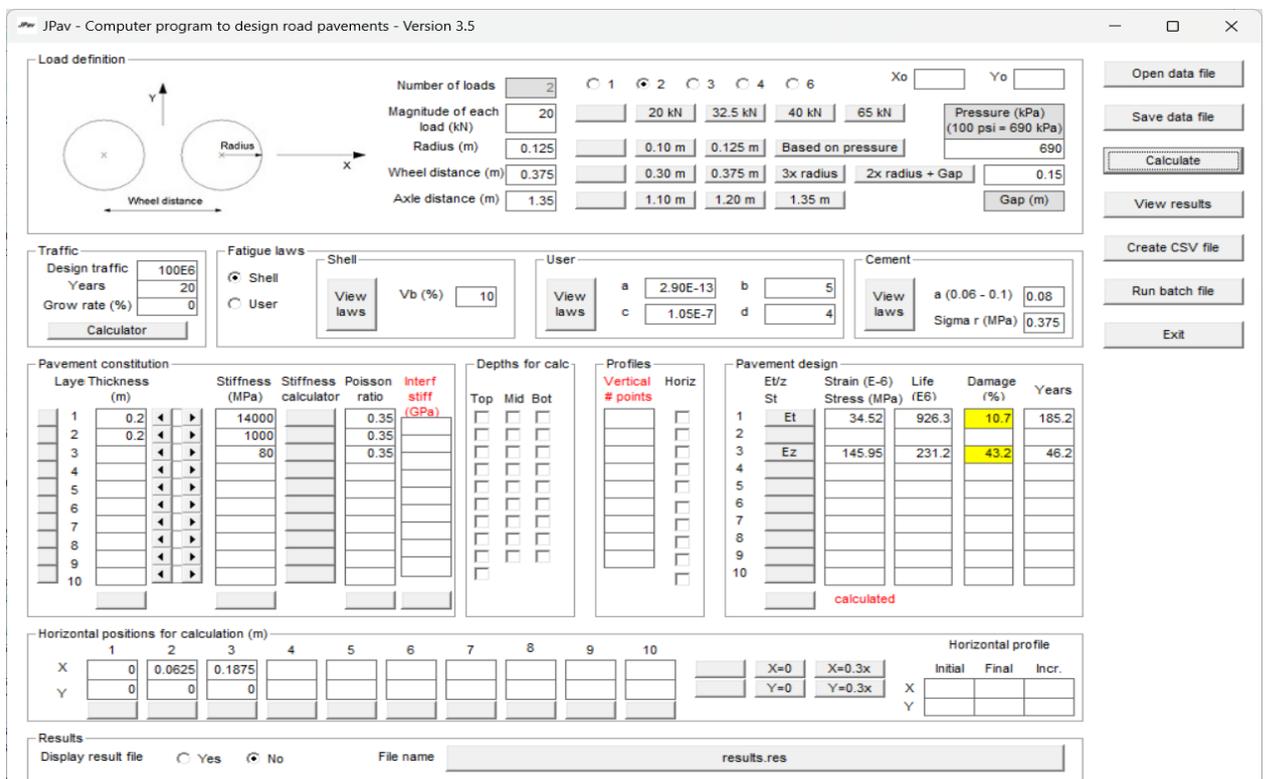


Figura 4. 55 Fundações com módulo de 80 MPa

JPav - Computer program to design road pavements - Version 3.5

Load definition

Number of loads: 2 (selected) 1 2 3 4 6

Magnitude of each load (kN): 20 (selected) 20 kN 32.5 kN 40 kN 65 kN

Radius (m): 0.125 (selected) 0.10 m 0.125 m Based on pressure

Wheel distance (m): 0.375 (selected) 0.30 m 0.375 m 3x radius 2x radius + Gap

Axle distance (m): 1.35 (selected) 1.10 m 1.20 m 1.35 m

Pressure (kPa) (100 psi = 690 kPa): 690

Gap (m): 0.15

Traffic: Design traffic: 100E6, Years: 20, Grow rate (%): 0

Fatigue laws: Shell (selected), User, Cement

Pavement constitution:

Laye	Thickness (m)	Stiffness (MPa)	Poisson ratio	Interf stiff (GPa)
1	0.2	14000	0.35	
2	0.2	1000	0.35	
3		100	0.35	
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Horizontal positions for calculation (m):

X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X	0	0.0625	0.1875							
Y	0	0	0							

Pavement design:

ET/z St	Strain (E-6)	Life (E6)	Damage (%)	Years
Et	33.38	1094.7	9.1	218.9
Ez	133.45	330.8	30.2	66.1

Results: Display result file: Yes No, File name: results.res

Figura 4. 56 Fundações com módulo de 100 MPa

Como o equipamento laboratorial para avaliação da resistência à fadiga apenas dispõe da capacidade de realização de ensaios em controlo de deslocamento, do software JPav obteve-se a extensão a que o betão de cimento está sujeito quando aplicado no pavimento, tendo-se obtido valores da ordem dos 33×10^{-6} .

Para esta ordem de grandeza de extensão de tração, os materiais de pavimentos apresentam tendencialmente uma vida infinita, sendo isto que se passa para os materiais asfálticos, pelo que para os materiais de base cimentícia, a vida será também infinita.

Para isso fizeram-se ensaios de fadiga em flexão em quatro pontos com vigas prismáticas extraídas das lajes produzidas com cada um dos betões em estudo, além do betão de referência.

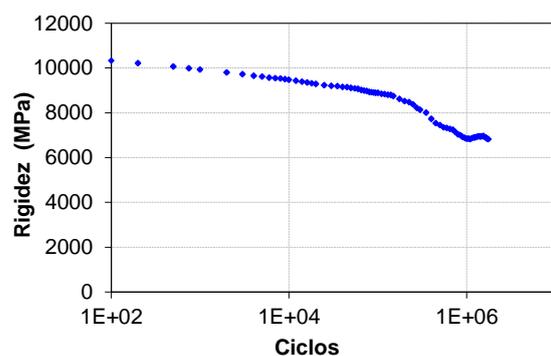
Tipicamente os ensaios de fadiga são realizados a vários níveis de extensão de modo a permitir determinar a vida do material à extensão de projeto.

Fizeram-se ensaios preliminares para determinar os níveis de extensão a que se poderiam realizar os ensaios e verificou-se que, impondo uma vida máxima de um milhão de ciclos de carga a 10 Hz, os ensaios teriam de ser realizados a um nível de extensão superior a 400×10^{-6} .

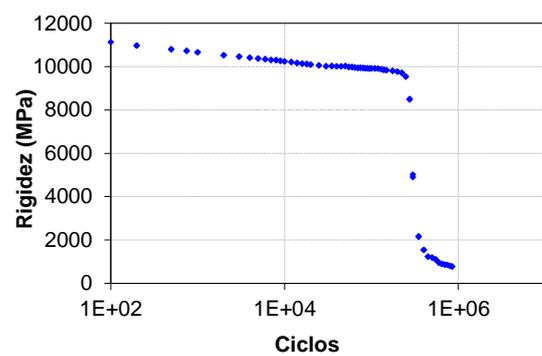
Assim, fizeram-se os ensaios de fadiga que se encontram nas figuras seguintes. Estes ensaios foram realizados para uma extensão de 450×10^{-6} , com exceção do ensaio à viga 201 em que foi utilizada uma extensão de 200×10^{-6} .

Analisando o ensaio à viga 201 verifica-se que para um nível de extensão de 200×10^{-6} , a perda de rigidez do material durante o ensaio até um milhão de ciclos de carga foi inferior a 5%, o que para níveis de extensão compatíveis com os existentes nos pavimentos rodoviários conduziria a uma vida infinita.

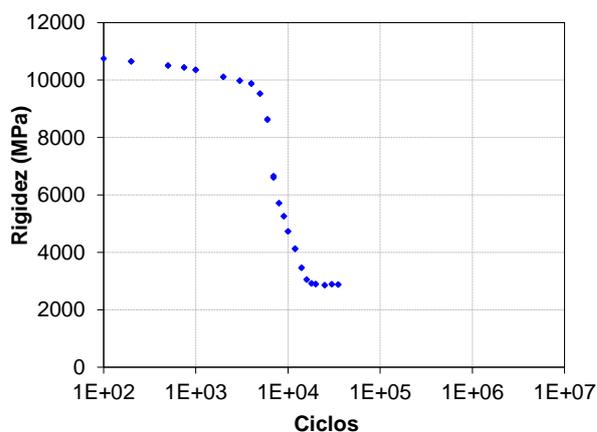
Mesmo para os restantes ensaios realizados a níveis de extensão 450×10^{-6} , a vida do material é extremamente elevada, o que extrapolada para níveis de extensão compatíveis com os existentes nos pavimentos rodoviários conduziria a uma vida também infinita. Deste modo é possível garantir que estes betões drenantes podem ser aplicados em pavimentos rodoviários com a garantia que suportam as cargas do tráfego com desempenhos compatíveis com os pavimentos em betão de cimento.



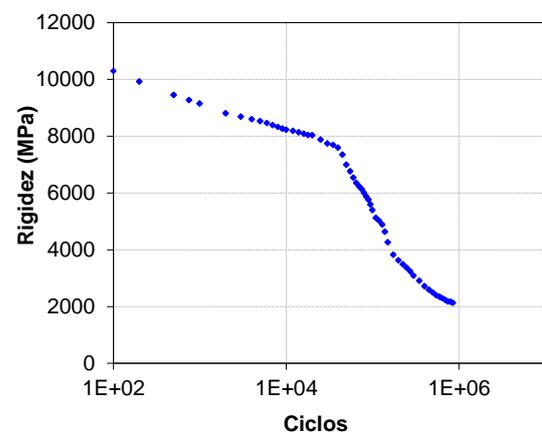
B-RCD de 10% 1



B-RCD de 10% 3

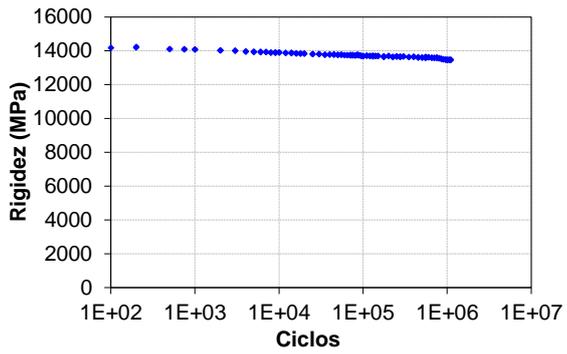


B-RCD de 10% 4

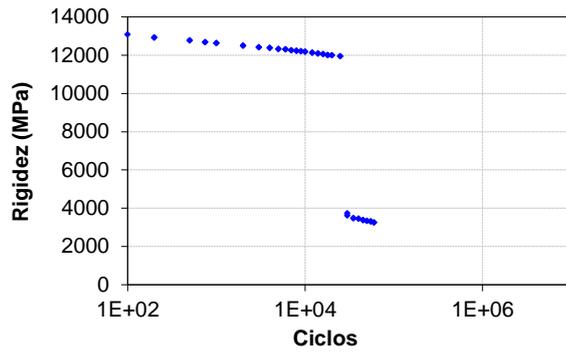


B-RCD de 10% 5

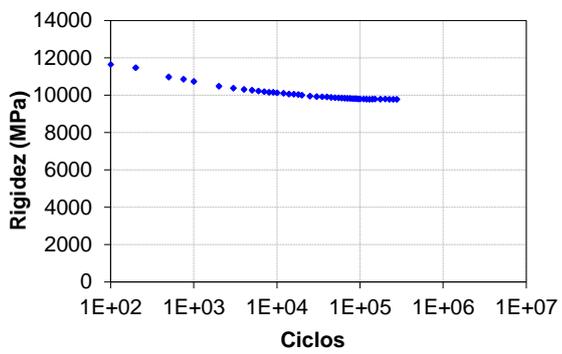
Figura 4. 57 Resultado dos ensaios de B-RCD de 10%



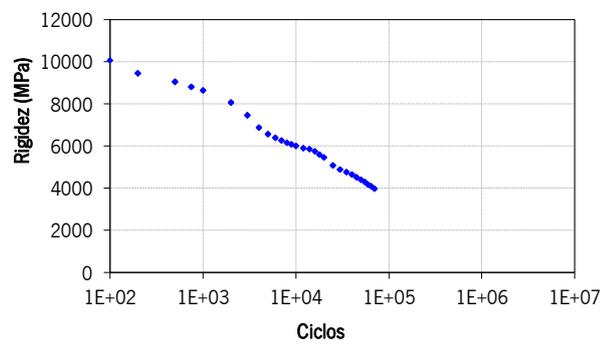
B-RCD de 201



B-RCD de 202

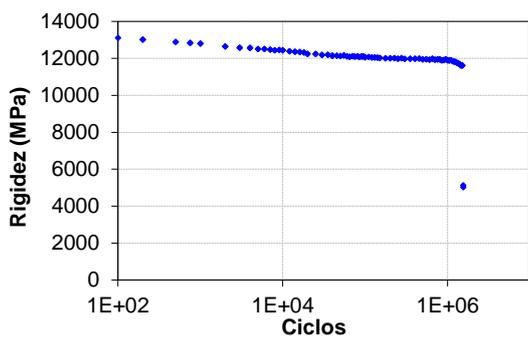


B-RCD de 203

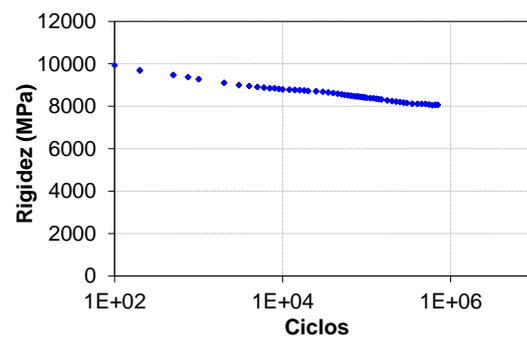


B-RCD de 204

Figura 4. 58 Resultados dos ensaios de B-RCD de 20%

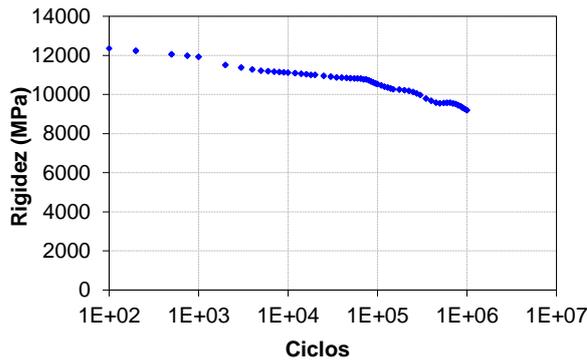


B-RCD de 303

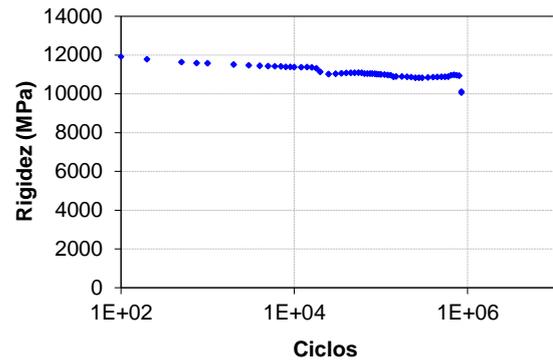


B-RCD de 304

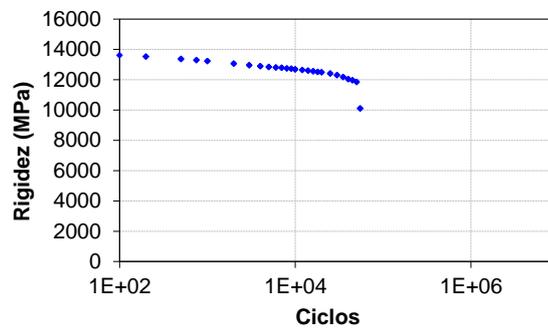
Figura 4. 59 Resultado dos ensaios de B-RCD de 30%



BN-REF 3



BN-REF 4



BN-REF 5

Figura 4. 60 Resultado dos ensaios de BN-REF

Tabela 4. 40 Ensaio de Fadiga dos betões com agregados reciclados

Tipos de ensaios	Nº de ciclos (1E+06)	Rigidez (MPa)
REF	10 ⁶	10 250
10% RCD	10 ⁶	4 500
20% RCD	10 ⁶	13 500
30% RCD	10 ⁶	12 000

4.3.21. Consideração final

O ensaio desta terceira fase do trabalho permitiu concluir que o fuso granulométrico com agregados de RCD e com uma dosagem de cimento de 300 kg/m³ pode obter-se um betão com a permeabilidade e resistência adequada aos fins a que se destina, utilizando uma razão água cimento de 0.30 e um tempo de vibração de 40 segundos, estes valores que serão utilizados no trabalho para a aplicação de conceção do betão drenante para pavimentos rígidos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Neste capítulo serão descritas todas as fases da investigação experimental que conduziram à concepção de um betão drenante com resíduos de construção e demolição, salientando-se essencialmente a produção dos betões e os seus requisitos segundo a normalização.

O primeiro objetivo passou por verificar a possibilidade de desenvolver um betão de cimento drenante utilizando agregados naturais que cumprissem o fuso granulométrico definido para os betões asfálticos drenantes, tendo-se verificado a drenabilidade desse betão de cimento. Para garantir a resistência mecânica do betão drenante, o mesmo teria de ser formulado com uma dosagem de cimento de 300 kg/m³.

O segundo objetivo foi analisar as principais propriedades de três betões drenantes com agregados normais variando a razão água/cimento (0,30, 0,35 e 0,40) e para cada um destes betões utilizando três tempos de vibração (20, 40 e 60 segundos), utilizando a dosagem de cimento de 300 kg/m³ definida na fase anterior. Daqui resultou o betão drenante de referência com agregados naturais, com uma quantidade de cimento de 300 kg/m³, uma razão A/C de 0,30 e um tempo de vibração de 40 segundos, a utilizar como referência para a concepção de um betão drenante com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.

O terceiro objetivo foi o desenvolvimento de um betão drenante com resíduos de construção de demolição utilizando-se três taxas de incorporação de agregado reciclado, nomeadamente 10%, 20%, e 30%, em substituição do agregado natural.

O dimensionamento de pavimentos é atualmente realizado com base em metodologias racionais que incluem o estudo do comportamento da estrutura sob dois aspetos distintos: Comportamento funcional e comportamento estrutural, pelo que o desenvolvimento do betão drenante foi realizado avaliando-se as propriedades estruturais e funcionais do betão.

Como uma observação dos agregados pode-se mencionar que a utilização dos agregados de RCD com betões de PA 12,5 resulta em betões entre leves e normais, é uma combinação que pode ser bastante útil para aplicações em pavimentos sobre viadutos e pontes (em betão leves e normais).

O betão drenante tem em seu benefício os materiais utilizados que são simples que podem encontrar em todos os países com os diferentes tipos e qualidades.

A reciclagem surge como uma nova alternativa aos processos tradicionais e como uma medida de combate à escassez dos diferentes recursos. É assim, como resposta a problemas ambientais e económicos, que surge a ideia de transformar o RCD num novo pavimento.

A necessidade de reutilização desses resíduos acaba por ser extremamente importante tanto para o âmbito ambiental, assim como em carácter económico e em relação aos parâmetros de sustentabilidade.

No que diz respeito aos Resíduos da Construção e Demolição RCD encontrados tanto no processo de fabricação, como na execução de obras, facilitam e ajudam nas quantidades dos agregados na utilização do betão drenante.

A alteração e prevenção destes fatos, a única solução é a manutenção e reparação relativamente aos betões de referência destaca-se o seguinte:

- Razão A/C mais elevado menor a permeabilidade
- À medida que mais A/C a porosidade decresce
- Quanto maior vibração e mais elevado A/C menor a porosidade, refletindo num decréscimo de permeabilidade.
- Quanto maior a resistência à compressão e flexão, menor a permeabilidade.

Estas diferenças das análises de porosidade e permeabilidade, devem-se à existência de poros interiores sem acesso à água.

No entanto, a resistência à compressão e flexão do betão de 10%, 20% e 30% de reciclado reduziu a resistência cerca de 3 - 31% para os provetes submetidos a 28 dias respetivamente.

Ao longo do tempo de ciclos, a quantidade de sulfatos, gelo degelo, aumenta ao preencher os poros e a quantidade de poros diminui, aumentando a massa molecular e a respetiva rigidez do betão. Este é um dos principais fatores que causam a deterioração dos pavimentos de betão drenante.

Para analisar os resultados mancha de areia, pendulo britânico, textura, e do ensaio de fadiga foi possível confirmar que a utilização dos agregados reciclados induz em geral uma redução da resistência

à fadiga, muito provavelmente como consequência do aumento do módulo de rigidez dos betões de reciclados e dos vazios obtido em toda a gama e frequências.

A variação de resistência foi definida como o rácio de referência, em que a resistência à compressão e flexão em relação com a permeabilidade são as principais causas, submetidos as normas, respetivamente, os provetes ensaiados à mesma dimensão e idade. A partir destes resultados de permeabilidade e a resistência, foi possível concluir tratar-se de um betão drenante.

Verifica-se que o betão drenante de referência e betões de RCD, tanto o betão de compactação 20, 40 e 60 segundos de vibrado possuem valores superiores de absorção quando comparados com outros betões.

A resistência deste tipo de betões drenantes está inversamente proporcional à porosidade, isto é, quanto maior a porosidade menor será a resistência, assim ao contrário.

As relações dos ensaios na análise dos dados demonstram os resultados normais em comparação com os artigos, teses publicadas e em vigor do limite das normas aplicáveis.

As vantagens económicas e ambientais da utilização de agregados normais e agregados de resíduos da construção de betão parece ser inteligível. No entanto, será importante avaliar a sustentabilidade destes betões com base no conceito da análise do ciclo de vida, de forma a evidenciar sem margem de dúvidas as vantagens desta solução.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos apresentados nesta tese de doutoramento são um contributo importante para o conhecimento relativo à utilização de resíduos de demolição do betão em betão de cimento drenante para pavimentos de estradas. No entanto, a abrangência do tema fez com que algumas variáveis não fossem totalmente exploradas durante o período em que foram realizados os trabalhos de doutoramento, sendo as mesmas aqui sugeridas como desenvolvimentos futuros neste tema.

Assim, o principal estudo na sequência do trabalho realizado deverá ser a verificação da sua aplicabilidade e o seu comportamento ao longo do tempo sob a ação de tráfego real. Só depois de comprovado o seu desempenho neste tipo de estudo será possível convencer a sociedade em geral das vantagens da sua aplicação.

Além disto, novas abordagens de análise podem ser consideradas, entre as quais pode referir-se as seguintes:

- Estudar betões drenantes com agregados de dimensões inferior a 14 mm de modo a obter uma superfície menor ruidosa;
- Utilizar fibras para reforço estrutural do betão drenante;
- Avaliação do ruído de tráfego rodoviário em pavimento drenante como camada de desgaste;
- Estudar a aplicação destes betões drenantes no reforço de estradas nas quais não exista problemas de cotas.

6. ARTIGOS PUBLICADO E SUBMETIDOS

6.1.1. Artigo Publicado

1. Artigo 1 (Jornal de Espana)

Citation/Citar como: Ximenes, J.; Jesus, C.; Aguiar, J.; Pais, J. (2022)

Mix design and physical and mechanical properties of pervious concretes. *Materiales Construcción*. 72 Issue [348], e 297 ISSN-L:0465-2746.
<https://doi.org/10.3989/mc.2022.292722>.

PUBLISHED: 2022-10-13 Email: lebenei@yahoo.com ou clientejoseximenes@gmail.com

<https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/issue/view/343>

6.1.2. Artigos Submetidos

2. Artigo 2 foi submetido ao Jornal (Advance in concrete technology) 2022

Physical and Mechanical Properties of Pervious Concrete in Mixtures with Recycled Aggregates 2022

José M. Ximenes^{*1}, Vojtěch Uher², Carlos M. Jesus¹, José B. Aguiar¹, Jorge C. Pais³

3. Artigo 3 foi submetido ao Jornal de (Construction innovation Emirald) 2022

Performance of Porous Concretes with Recycled Aggregates

José M. Ximenes^{1*}, Carlos Jesus¹, José B. Aguiar¹, Jorge Pais², Carlos Palha²

6.1.3. Artigos não Submetidos

4. Artigo 4 2023

Benefit of the macrotecture of the porous pavement with recycled aggregate

José Ximenes^{1*}, José Aguiar¹, Jorge Pais², Carlos de Jesus¹, Carlos Palha²

5. Artigo 5 2023

Drainage Concrete Formulation for Road Pavements

José Ximenes^{a)*}, Aires Camões^{b)}, José B. Aguiar^{b)}, Jorge Pais^{c)}

6.1.4. Conferencia e Congressos Internacionais (em Português e Inglês)

1. UNTL Timor-Leste 3ª Conferencia Internacional da Produção do Conhecimento Científico em TL na Faculdade de Educação, Artes e Humanidades no dia 13-14 de setembro de 2018.

Formulação de Betão Drenante para Aplicação em Pavimentos de Estradas

José Ximenes^{1*}, José Aguiar¹, Jorge Pais², Carlos de Jesus¹, Carlos de Palha²

2. Faro - Algarve Portugal INCREaSE 2019 10 -12 de outubro

Characterization of Drainage Concrete in Roads Pavements Construction

José Ximenes¹, José B. Aguiar¹, Jorge C. Pais¹

6.1.5. Congressos Construção Internacional (em Português)

1. 4º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis Salvador, 18-20 de novembro de 2020 com título: Desempenho de Misturas Drenantes na Prevenção de Zonas com Elevado Risco de Água
José Ximenes^{1*}, Carlos de Jesus¹, José Aguiar²
2. Congresso Construção 2022 Azúrem Guimarães - De 5 a 7 de dezembro de 2022 a Universidade do Minho.
Propriedades de Betão Drenante em Misturas com Agregados Reciclados
José M. Ximenes^{*1}, Vojtěch Uher², Carlos M. Jesus¹, José B. Aguiar¹, Jorge C. Pais³

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Montes F. et al., “Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete,” *Environmental Engineering Science*, vol. 23, no. 6. Mary Ann Liebert, Inc., publishers, pp. 960–969, Nov. 01, 2006, doi: 10.1089/ees.2006.23.960.
- [2] Florida U., “Performance Assessment of Portland Cement Pervious Pavement,” no. June. 2007.
- [3] Paul T. D. et al., *Pervious Concrete Pavements*, vol. Portland C, no. January. 2004.
- [4] Deo O. et al., “Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features,” no. Mater. Sci. Eng., p. vol. 528, no. 1, pp. 402–412, 2010, doi: 10.1016/j, 2010.
- [5] Crouch L. et al., “Measuring the Effective Air Void Content of Portland Cement Pervious Pavements,” *Cem. Concr. Aggregates*, vol. 25, no. 1, pp. 1–5, 2003, doi: 10.1520/CCA10516J.
- [6] Dean S. W. et al, “A New Test Method for Porosity Measurements of Portland Cement Pervious Concrete,” *J. Astm Int.*, vol. 2, Jan. 2005, doi: 10.1520/JAI12931.
- [7] Zouaghi A. et al., “Fundamental study on some properties of pervious concrete and its applicability to control stormwater run-off,” vol. 22. pp. 43–50, Jan. 2000.
- [8] Olek J. et al., “Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials.” 2003.
- [9] Neithalath N. et al., “Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements,” *ResearchGate*, no. 315, pp. 1–22, 2006.
- [10] Martin W. D. et al., “Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 59, pp. 78–84, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.034.
- [11] Debnath B. et al., “Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 8436, 2018, doi: 10.1080/10298436.2018.1554217.
- [12] APEB, “Guia para a utilização da norma NP EN 206-1: A especificação do betão,” *APEB - Assoc. Port. das Empres. Betão Pronto*, p. 19, 2008.

- [13] Hendrickx I. L. et al., "Noiseless concrete pavements," 1998.
- [14] EPA, "Storm Water Technology Fact Sheet Bioretention," p. 8, 1999, doi: 832-F-99-006.
- [15] Souza M., "Engenharia Civil," vol. 61, no. 1. pp. 13-18, 2008.
- [16] E.P. - Estradas de Portugal, *Pavimentação, Características dos materiais*, no. Caderno de Encargos Tipo Obras. 14.03-. 2014.
- [17] Araújo P. J., "Avaliação da sustentabilidade de estruturas e materiais de pavimentos rodoviários," p. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2016.
- [18] Aguiar J. L. B., *Materiais de construção I sobre Pedras, Ligantes, argamassas, madeiras e Metais*. Universidade do Minho, Guimarães Portugal, 2007.
- [19] JAE, "Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional." pp. 54, Lisboa Portugal., 1995.
- [20] Gonçalves R. D. C., "Agregados reciclados de resíduos de concreto - um novo material para dosagens estruturais.," Escola Politécnica da Universidade de São Paulo., 2001.
- [21] Aguiar J. L. B., "Building materials I," 2007.
- [22] Decreto lei N.º 64/2017 de 2 de outubro, "Decreto do Presidente da República veio definir a rede rodoviária nacional de Timor-Leste," p. Dili, Timor-Leste, 2017.
- [23] Maganinho L., "Desenvolvimento de uma base de dados de patologias para a avaliação da qualidade de pavimentos rodoviários com recurso a GPS , imagem vídeo e SIG," no. Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Universidade de Beira Interior. p. Portugal, 2013.
- [24] JAE, "Manual de Concepção e Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional -." p. 56, 1995.
- [25] Pereira A. J. C., "Análise Do Custo Do Ciclo De Vida Da Eta Queimadela," p. 121, 2009.
- [26] IPQ - NP EN 13242, "Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária , " p. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Lisboa, 2002.
- [27] Nunn M. E. et al., "Assessment of methods to prevent reflection cracking, 2nd International RILEM Conference on 'Reflective Cracking in Pavements - State of the Art and Design Recommendations' , Liege.," 1993.

- [28] INIR, “Construção e Reabilitação de Pavimentos - Reciclagem de Pavimentos,” p. 49, 2012.
- [29] IPQ - NP EN 14227-10, “Misturas tratadas com ligantes hidráulicos; Especificações; Parte 10: Solo tratado com cimento.,” p. Caparica, Instituto Português da Qualidade (IPQ)., 2013.
- [30] IPQ - NP EN 206:2013 +A1, “Betão Especificação, desempenho, produção e conformidade Betão,” p. Instituto Portuguesa da qualidade 1-29, Caparica, 2005.
- [31] Estradas de Portugal, “Características dos Materiais de Pavimento,” 2009.
- [32] BS EN 14227-10:2006, “Hydraulically bound mixtures - Specifications - Part 10: Soil treated by cement,” vol. 3, 2006.
- [33] IPQ - NP EN 14227-11, “Misturas tratadas com ligantes hidráulicos; Especificações; Parte 11: Solo tratado com cal,” p. Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica, 2013.
- [34] Branco L. P. et al., “Pavimentos rodoviários.” Almedina, Coimbra., 2008.
- [35] Pais J., “Pavimentos Rodoviária capítulo 1 até 8.” 2018.
- [36] Pereira R., “Controlo Da Qualidade De Betões segundo a Norma NP EN 206.1,” Universidade do Minho, 2014.
- [37] Branco L. et al., “Pavimentos Rodoviários, Edições Almedina,” p. Portugal, 2005.
- [38] IPQ - NP EN 206-1, “Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade,” *Concrete*, 2007.
- [39] LNEC - E 462, “Betão. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário,” p. Laboratorio Nacional Engenharia Civil, Lisboa, Por, 2004.
- [40] Operation, “<https://operation.com.br/densidade-dos-materiais>.” .
- [41] Skarendahl A., “Environment (Background Document). In Self-Compacting Concrete,” no. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committ, 2000.
- [42] IPQ - NP EN 4041, “Norma Portuguesa 4041,” no. Ci, Descritores Elabora, Ncia Pre, Digo D E. pp. 1–29, 2005.
- [43] Carvalho M. et al., “Reaproveitamento dos entulhos de concreto na construção de casas populares. XXVIII <https://docplayer.com.br/15834430-Reaproveitamento-dos-entulhos-de...>,” no. Encontro nacional de engenharia de produção. Rio de Janeiro, RJ, 2008., 2008.
- [44] Carrijo P. M., “Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de

- resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto,” *Esc. Politécnica*, vol. Mestrado, p. 129, 2005.
- [45] Gonçalves R. D. C., “Novo materiais para dosagens estruturais Rodrigo Dantas Casillo Gonçalves,” Universidade de São Paulo, 2001.
- [46] RILEM, “Specifications for concrete with recycled aggregates. *Material and Structures*, v.27, 1994. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1577652>,” 1994.
- [47] Vanacker A., “Recycling of concrete at precast concrete plant.,” vol. *Juliet*, p. p.55-67, 1996, [Online]. Available: BIBM Paris.
- [48] Basheer L. et al., “Assessment of the durability of concrete from its permeation properties,” *Constr. Build. Mater. V 15, p,93-103*, 2001.
- [49] Metha P. et al., “Concrete estrutura, propriedades e materiais,” *São Paulo Pini*, 1994.
- [50] Gonçalves M. et al., “Influence of recycle concrete aggregates on concrete durability,” *Int. RILEM Conf. use Recycl. Mater. Build.*
- [51] Powers C. T., “Physical properties of cement paste.,” *Chem. Cem. Proc. Fourth Int. Symp.*, vol. V.II, pp. 577-613., 1960.
- [52] DNIT, “Manual de pavimentos rígidos 2005,” *Man. Pavimntos Rígidos*, p. 234, 2005.
- [53] IPQ - NP EN 197-1, “Cimento Part 1: Composição especificações e critérios de conformidade para cimentos corrente,” no. Instituto Português da Qualidade, p. Caparica, Lisboa Portugal, 2012.
- [54] IPQ - NP EN 13139/AC, “Agregados para Argamassas,” p. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Lisboa, 2010.
- [55] Cabral A. E. B., “Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do rcd,” Escola de engenharia de são Carlos, 2007.
- [56] IPQ - NP EN 1008., “Água para utilização da construção,” no. Instituto Português da Qualidade, p. Caparica, Lisboa Portugal, 2003.
- [57] ASTM - C 33, “ASTM C 33 Concrete and Concrete Aggregates 1,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 04, no. 4, pp. 4–7, 2001.

- [58] ASTM C 33, "ASTM C33 - Grading Requirements for Coarse Aggregates - Size N89," .
- [59] IPQ - NP EN 12350-2, "Ensaio do betão fresco; Parte 2: Ensaio de abaixamento." p. 11, 2009.
- [60] IPQ - NP EN 12350-3, "Ensaio do betão fresco Parte 3: Ensaio Vêbê," p. 12, 2009.
- [61] IPQ - NP EN 12350-6, "Ensaio do Betão Fresco - Parte 6: Massa Volúmica," p. 12, 2002.
- [62] IPQ - NP EN 12350-7, "Ensaio do betão fresco - Parte 7: Determinação do teor de ar Métodos pressiométricos," p. 26, 2009.
- [63] IPQ - NP EN 12390-2, "Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica," 2009.
- [64] NLT-327/00, "Permeabilidade in situ de pavimentos drenantes mediante permeómetro LCS," 2000.
- [65] prEN 12697 40, "Pprermeametro.KLCS pdf." .
- [66] EP - Estradas de Portugal, "Pavimentação - Características dos materiais," *Cad. Encarg. Tipo Obra*, vol. 03, p. 125, 2014.
- [67] ACI 522R-06, "Technical information on Pervious Concrete,s aplicacion desig," *Tech. Doc.*
- [68] Barnes S., *Principles of Geotechnical Engineering*. 2002.
- [69] LNEC - E 394, "Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica.," no. Laboratorio Nacional Engenharia Civil, p. Lisboa, Portugal., 1993.
- [70] IPQ - NP 581, "Determinação de massas volumétricas e absorção de água de agregados e pedras; padrão escrito em português em pdf." 1969.
- [71] IPQ - NP EN 12390-7, "Ensaio do Betão Endurecido - Parte 7: Massa Volúmica do Betão Endurecido." p. 12, 2003.
- [72] IPQ - NP EN 772-11-2002, "Determination of water absorption by capillarity of blocks." .
- [73] N. E. 12390-3, "Betao Endurecido Resistencia à compressao.pdf." .
- [74] I.-N. E. 12390-6, "Ensaio do betão endurecido - Parte 6: Resistência à tração por compressão de provetes." p. 14, 2003.
- [75] IPQ - NP EN 12390-5 12390-5_betao_endurecido_resistencia_flexao.pdf, "Betao endurecido resistencia à flexao pdf." .

- [76] LNEC - E.397-1993, “Determinação da resistência à compressão do modulo de elasticidade.”
- [77] IPQ - NP EN 1097-2, “Los Angeles Machine Wear Resistance Test,” no. Instituto Português da Qualidade, . p. Caparica, Lisboa, 2002.
- [78] IPQ - NP EN1367-2002, “Ensaio de sulfato magnésio pdf.” .
- [79] A. C666, “Ensaio gelo-degelo.pdf.” .
- [80] E. Standard, “Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 4 : Method for measurement of slip / skid resistance of a surface : The pendulum test,” 2011.
- [81] IPQ - NP EN 13036-1 2011, “Características superficiais de Pavimentos de estradas e aeroportos. Ensaio da parte 1: Medição da profundidade da macrotextura da superfície do pavimento através da técnica volumétrica da mancha,” 2015.
- [82] Gum I., “Avaliação de dados de medição: Guia para expressão de medição,” *INMETRO (INSTITUTO Nac. Metrol. Qual. E Tecnol.*, vol. Duque de C, p. 141 p., 2012.
- [83] B. E. 12697-24, “Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt,” vol. 3, no. 1. 2007.
- [84] EN 13108-7, “Bituminous mixtures - Material specifications - Part 7: Porous Asphalt Mélanges,” BS, 2013.

{Bibliography