



Desenvolvimento de soluções para aplicação em pavimentos industriais com recurso à incorporação de fibras recicladas

UMinho | 2022 Francisco Pinto de Abreu Mendes Peixoto

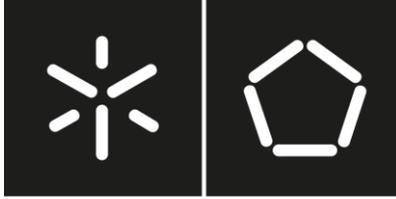


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Francisco Pinto de Abreu Mendes Peixoto

Desenvolvimento de soluções para aplicação em pavimentos industriais com recurso à incorporação de fibras recicladas

Dezembro de 2022



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Francisco Pinto de Abreu Mendes Peixoto

Desenvolvimento de soluções para aplicação em pavimentos industriais com recurso à incorporação de fibras recicladas

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor Dinis Miguel Campos Leitão

Doutor Vítor Manuel Couto Fernandes Cunha

Dezembro de 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do Repositório UM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

Porque na vida nada conseguimos sozinhos, este trabalho espelha tudo aquilo que eu sou e tem parte de cada um de vocês que caminha a meu lado! Assim, agradeço...

Ao meu orientador Professor Doutor Dinis Miguel Campos Leitão pelos conselhos e ajuda transmitidos.

Ao meu coorientador Doutor Vitor Manuel Couto Fernandes Cunha pela partilha de todo o seu conhecimento e pela sua amabilidade! O meu sincero obrigado pela orientação exemplar e sempre presente.

Foi um gosto e um orgulho trabalhar com eles.

A todos quantos me acompanharam durante todo o programa experimental, pela amabilidade e ajuda desmedida. Em especial à Norma Gaibor, à Ana Rita Neves e ao Professor Doutor Eduardo Nuno Borges Pereira pela ajuda durante a execução dos ensaios experimentais e pela partilha constante de conhecimentos.

Este trabalho foi realizado no âmbito dos projetos de investigação “*CirMat - CIRcular aggregates for sustainable road and building MATerials*” financiado pelo European Economic Area (EEA) Financial Mechanism 2014-2021 gerido pela Secretaria de Estado do Ambiente, assim como do “*RENEw - Resíduos na construção para uma economia circular*”, POCI-01-0247-FEDER-033834, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e com o Programa Operacional da Competitividade e Internacionalização do Portugal 2020 (COMPETE 2020). Adicionalmente, o trabalho enquadra-se nas atividades da *Cátedra dst/IB-S: Smart Systems for Construction*.

Aos meus pais e aos meus irmãos, aos quais devo inteiramente todo o meu ser. Ao meu pai, por todo o seu apoio e orgulho incondicional. À minha mãe, que é a mulher da minha vida, uma força da natureza. Obrigada por seres a minha grande inspiração!

À minha namorada, pela infindável paciência, pela celebração de todas as minhas conquistas como se fossem suas, pelo companheirismo desmedido e pela pessoa única e maravilhosa que é.

Para a Doutora Graça Coelho, um obrigado especial por me ter dado o discernimento necessário para terminar este projeto e por me ter dado a oportunidade de desenvolver um conjunto de competências transversais ao curso de Engenharia Civil.

Finalmente, devo um agradecimento especial a todos os meus amigos pela sua sincera amizade. Por isso, obrigado: Diogo “Didu”, Horácio, José “Zezinho”, Armando, João “Guima”, Renato, Daniel “Calças”, Cartucho e Nuno.

A todos o meu sincero e profundo **Muito Obrigado!**

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

Desenvolvimento de soluções para aplicação em pavimentos industriais com recurso à incorporação de fibras recicladas

Os sistemas de pavimentação industrial, como um segmento especializado do setor da construção, têm recebido cada vez mais atenção em virtude dos crescentes requisitos de qualidade e exigências de performance estrutural. Adicionalmente, nos últimos anos para além da valorização das boas condições e características das infraestruturas, cada vez mais são valorizadas soluções de cariz iminentemente sustentável e a responderem às preocupações da sociedade com o meio ambiente e com a gestão racional dos recursos naturais.

Assim, o presente trabalho pretende contribuir para a redução do consumo de matérias-primas (em particular agregados naturais), assim como o aumento do conhecimento na área da reutilização de materiais, diminuição de resíduos em aterro, e para a transição do setor da construção para a economia circular, dando principal destaque ao setor dos pavimentos industriais. Para tal, foi desenvolvida uma investigação experimental ao nível do desenvolvimento de betões para aplicações estruturais com a incorporação de uma elevada quantidade de resíduos. Um dos principais propósitos deste trabalho consistiu num detalhado estudo das propriedades mecânicas de betões cuja dosagem de agregados naturais e de cimento foi substituída por resíduos provenientes da indústria siderúrgica e cerâmica. A caracterização foi realizada por intermédio de ensaios de compressão, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral. O outro grande objetivo desta investigação foi avaliar os benefícios técnicos da utilização de fibras de aço recicladas (FAR) no reforço do betão. Este reforço induz inúmeras vantagens nos pavimentos industriais, nomeadamente aumento da capacidade de absorção de energia, melhoramento no controlo de fendilhação e redução dos custos de produção. Como tal, analisaram-se as propriedades geométricas e mecânicas das FAR e as propriedades mecânicas pós-fissuradas dos betões reforçados com fibras de aço recicladas (BRFAR).

Neste trabalho foi possível desenvolver betões com propriedades mecânicas adequadas a uma aplicação estrutural, no entanto, em virtude da elevada incorporação de resíduos, nomeadamente, agregados da siderurgia, os quais possuem um elevado grau de porosidade, ainda subsistem alguns desafios ao nível da otimização das propriedades reológicas para uma aplicação em pavimentos.

Palavras-chave: Agregado siderúrgico inerte para a construção (ASIC); Betões sustentáveis; Fibras de aço recicladas; Pavimentos industriais; Propriedades mecânicas; Resíduos cerâmicos.

Abstract

Development of solutions for industrial pavements with the incorporation of recycled fibers

Floors on ground and Industrial Pavements, as a specialized segment of the construction sector, have received increasing attention due to growing quality requirements and structural performance demands. Additionally, in the last few years, in addition to the valorization of good conditions and characteristics of infrastructures, solutions of an imminently sustainable nature are being increasingly valorized, in response to society's concerns with the environment and with the rational management of natural resources.

Thus, the present work intends to contribute to reducing the consumption of raw materials (in particular natural aggregates), as well as to increase knowledge in the subject of reuse of materials, reduction of waste in landfills, and to the transition of the construction sector to a circular economy, giving main emphasis to the industrial pavements sector. For that purpose, experimental research was carried out at the level of the development of concretes for structural applications with the incorporation of a high amount of waste. One of the main purposes of this work consisted in a detailed study of the mechanical properties of concretes whose dosage of natural aggregates and cement was replaced by waste from steel and ceramic industries. The characterization was accomplished by means compression, modulus of elasticity and modified splitting tensile tests. The other main goal of this research was to evaluate the technical benefits of using recycled steel fibers (RSF) in concrete reinforcement. This reinforcement provides numerous advantages in industrial pavements, like increased energy absorption capacity, improved cracking control and reduced energy production costs. As such, both geometrical and mechanical properties of RSF and the post-cracking mechanical properties of recycled steel fiber reinforced concrete (RSFRC) were analyzed.

In this work, it was possible to develop concretes with mechanical properties appropriate for structural application, however, due to the high incorporation of waste, namely, steel industry aggregates, which have a high degree of porosity, there are still some challenges in terms of optimizing the rheological properties for an application in industrial pavements.

Keywords: Electric arc furnace slag (EAFS); Sustainable concretes; Recycled steel fibers; Industrial pavements; Mechanical properties; Ceramic waste.

Índice

Agradecimentos	iii
DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE	v
Resumo.....	vi
Abstract	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xi
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Quadros	xv
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Objetivos e metodologia	2
1.3 Organização da Dissertação	3
2. Estado de arte	5
2.1. Evolução do conceito de pavimento industrial	5
2.2. Componentes dos pavimentos industriais	7
2.2.1. Solo ou subleito	8
2.2.2. Sub-base	10
2.2.3. Filme plástico ou membrana de impermeabilização	11
2.2.4. Laje de betão	12
2.2.5. Superfície de desgaste ou revestimento	15
2.3. Classificação dos pavimentos industriais	16
2.3.1. Classificação consoante a fundação	16
2.3.2. Classificação consoante o reforço estrutural	17
2.3.3. Classificação consoante o tipo de utilização	20
2.4. Betões com resíduos para incorporação em pavimentos industriais	22
2.4.1. Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC).....	23
2.4.2. Caracterização do ASIC como agregado.....	24
2.4.3. Definição e classificação dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	28
2.4.4. Incorporação de agregados reciclados de RCD no betão.....	30
2.4.5. Substituição parcial de cimento Portland por adições pozolânicas.....	31
2.4.6. Resíduos cerâmicos como adição ao cimento Portland.....	32
2.4.7. Betão reforçado com fibras recicladas provenientes de pneus.....	34
2.5. Especificações e normativas para pavimentos industriais e seus constituintes	43

2.5.1.	Especificações para os agregados	44
2.5.2.	Especificações para as fibras	45
2.5.3.	Especificações para o betão no estado fresco	46
2.5.4.	Betão endurecido	48
2.5.5.	Durabilidade	49
3.	Formulação de betão com agregados reciclados.....	51
3.1.	Introdução	51
3.2.	Método modificado de Andreasen & Andersen (A&A).....	52
3.3.	Materiais e composições.....	53
3.3.1.	Descrição dos materiais.....	53
3.3.2.	Composições de betão	59
3.4.	Procedimento de ensaios	63
3.4.1.	Abaixamento (Cone de Abrams)	63
3.4.2.	Módulo de elasticidade	65
3.4.3.	Relação tensão - extensão.....	67
3.4.4.	Ensaio de compressão diametral	68
3.5.	Amassadura e betonagem.....	70
3.6.	Comportamento no estado fresco	74
3.7.	Comportamento mecânico.....	75
3.7.1.	Relação tensão de compressão - extensão	75
3.7.2.	Módulo de elasticidade	80
3.7.3.	Resistência à tração.....	82
3.8.	Conclusões.....	83
4.	Formulação de betão com resíduos e fibras de aço recicladas.....	85
4.1.	Introdução	85
4.2.	Caracterização geométrica e mecânica das FAR	86
4.2.1.	Parâmetros geométricos	87
4.2.2.	Massa volúmica	91
4.2.3.	Processo de tratamento térmico das fibras	93
4.2.4.	Resistência à tração.....	94
4.3.	Composições e provetes	96
4.4.	Procedimentos de ensaio	99
4.4.1.	Ensaio à flexão em três pontos	99
4.5.	Propriedades no estado fresco.....	102
4.6.	Propriedades mecânicas.....	103

4.6.1.	Relação tensão – extensão.....	103
4.6.2.	Módulo de elasticidade.....	107
4.6.3.	Ensaio à flexão em três pontos.....	108
4.6.4.	Análise inversa.....	114
4.6.5.	Comentário final.....	118
5.	Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros.....	120
5.1.	Conclusões gerais.....	120
5.2.	Desenvolvimentos futuros.....	122
6.	Bibliografia.....	123

Lista de Abreviaturas e Siglas

ASIC – Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção

BARB – Betão com incorporação, total ou parcial, de Agregados Reciclados provenientes de Betão

BRF – Betão Reforçado com Fibras

CBR – *California Bearing Ratio*

CMOD – *Crack Mouth Opening Displacement*

CPT – *Cone Penetration Test*

CPTU – *Piezocone Penetration Test*

DP – *Dynamic Probing*

EAFS – *Electric Arc Furnace Slag*

FAI – Fibras de Aço Industriais

FAR – Fibras de Aço Recicladas

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

SPT – *Standard Penetration Test*

Índice de Figuras

Figura 1 - Fábrica têxtil (http://www.camilomarcelino.com/personagens/textil.jpg)	5
Figura 2 - Sistema construtivo de um pavimento industrial [adaptado de Cristelli (2010)]	8
Figura 3 - Filme plástico [adaptado de Cristelli (2010)].....	11
Figura 4 - Retração do betão [adaptado de Cristelli (2010)]	13
Figura 5 - Empenamento ou Curling (Cristelli, 2010)	14
Figura 6 - Exemplo de laje apoiada em estacas [adaptado de TR-34 (2018)]	17
Figura 7 - Pavimento reforçado com rede eletrossoldada (Passos, 2011).....	18
Figura 8 - Pavimento com reforço estrutural (Passos, 2011).....	18
Figura 9 - Curvas típicas tensão-deformação: betão convencional e BRF (ACI 544.1R-96, 2009)..	20
Figura 10 - Curvas Força - Flecha obtidas em vigas de BS, BR FAR e BR FAI (Frazão et al., 2021) .	42
Figura 11 - Relação entre teor de fibras e largura da fenda (ACI 544.1R-96, 2009).....	46
Figura 12 - Agregados naturais	54
Figura 13 - Curvas granulométricas dos agregados naturais	54
Figura 14 - ASIC com diferentes granulometrias.....	55
Figura 15 - Curvas granulométricas ASIC	55
Figura 16 - Cerâmico antes e após moagem	57
Figura 17 - Curva granulométrica pó cerâmico	57
Figura 18 - Cimento utilizado nas composições.....	58
Figura 19 - Material utilizado	64
Figura 20 - Configuração do ensaio de módulo de elasticidade.....	65
Figura 21 - Gráfico para a determinação do módulo de elasticidade (NP EN 12390-13, 2014)	67
Figura 22 - Configuração do ensaio de compressão uniaxial	68
Figura 23 - Configuração do ensaio à tração por compressão diametral	69
Figura 24 - Quantificação do teor de humidade dos agregados	70
Figura 25 - Betoneira de eixo vertical	71
Figura 26 - Procedimento das amassaduras	72
Figura 27 - Preparação e betonagem dos provetes	73
Figura 28 - Cura e retificação dos provetes	73
Figura 29 - Fotografias dos abaixamentos das misturas.....	74
Figura 30 - Relação tensão - extensão experimental da mistura B_REF.....	76
Figura 31 - Relação tensão - extensão experimental da mistura B_ASIC_50+50	76

Figura 32 - Relação tensão - extensão experimental da mistura B_ASIC_100	77
Figura 33 - Relação tensão - extensão experimental da mistura B_CER	77
Figura 34 - Provede com rotura inadequada (B_CER)	78
Figura 35 - Métodos de rotura	79
Figura 36 - Ensaio à tração por compressão diametral: Rotura Cilindros B_REF	82
Figura 37 - Amostra de fibras recicladas	86
Figura 38 - Determinação e análise do diâmetro das FAR.....	87
Figura 39 - Determinação e análise dos comprimentos das FAR.....	88
Figura 40 - Determinação e análise do comprimento desenvolvido das FAR.....	89
Figura 41 - Frequência relativa da esbeltez das FAR.....	90
Figura 42 - Frequência relativa do índice de curvatura das FAR	90
Figura 43 - Procedimento de medição da massa volúmica	92
Figura 44 - Tratamento térmico	93
Figura 45 - Limpeza das FAR.....	94
Figura 46 - Fibra tracionada.....	95
Figura 47 - Adição das fibras	98
Figura 48 - Procedimento do enchimento do molde prismático (BS EN 14651, 2005)	98
Figura 49 - Preparação dos provetes.....	100
Figura 50 - Ensaio à flexão de três pontos.....	101
Figura 51 - Transdutores para ensaio de flexão	101
Figura 52 - Fotografias dos abaixamentos	102
Figura 53 - Curvas tensão - extensão médias	104
Figura 54 - Curvas tensão - extensão individuais	105
Figura 55 - Modos de rotura no ensaio de compressão	106
Figura 56 - Curvas experimentais do ensaio à flexão: FRC_SIMP.....	108
Figura 57 - Curvas experimentais do ensaio à flexão: FRC_TRAT	109
Figura 58 (continuação) – Curvas experimentais do ensaio à flexão: FRC_OTIM	110
Figura 59 - Curvas médias força – flecha e força – CMOD	110
Figura 60 - Grelha utilizada para contar as fibras	112
Figura 61 - Curvas médias flecha - CMOD.....	113
Figura 62 - Malha de elementos finitos utilizada na simulação do ensaio à flexão (Cunha, 2010)	115
Figura 63 - Simulação numérica do ensaio à flexão: série FRC_SIMP	116

Figura 64 - Simulação numérica do ensaio à flexão: série FRC_TRAT	116
Figura 65 - Simulação numérica do ensaio à flexão: série FRC_OTIM	117
Figura 66 - Lei tensão - abertura de fenda obtida pela análise inversa.....	117

Índice de Quadros

Quadro 1 – Tipos de carregamento	12
Quadro 2 - Classe dos pavimentos consoante a utilização [adaptado de Passos (2011)]	21
Quadro 3 – Classificação dos pavimentos de acordo com ANAPRE (Passos, 2011)	22
Quadro 4 – Composição do betão (Pacheco, 2012)	26
Quadro 5 – RDCs valorizáveis por grupos (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019).....	29
Quadro 6 - Granulometria recomendada para BRFA [adaptado de ACI 544.1R-96 (2009)]	44
Quadro 7 - <i>Slump</i> recomendado pela (TR-34, 2018)	47
Quadro 8 - Razão a/c e limites da dosagem de cimento (NP EN 14845-1, 2007)	48
Quadro 9 - Propriedades e dosagens de cimento	49
Quadro 10 - Taxa de ataque no betão por ácidos (TR-34, 2018)	50
Quadro 11 - Valores máximos na perda por abrasão (IS 9284, 2002)	50
Quadro 12 - Propriedades dos agregados	54
Quadro 13 - Propriedades do ASIC	56
Quadro 14 - Composição química dos resíduos cerâmicos (Gaibor et al., 2021)	56
Quadro 15 - Dosagem da mistura B_REF.....	60
Quadro 16 - Dosagem da mistura B_ASIC_50/50	61
Quadro 17 - Dosagem da mistura B_ASIC_100	62
Quadro 18 - Dosagem da mistura B_CER	63
Quadro 19 - Classes de abaixamento (NP EN 206, 2013b)	65
Quadro 20 - Propriedades no estado fresco	74
Quadro 21 - Resistência à compressão média aos 7, 28 e 90 dias	78
Quadro 22 - Módulo de elasticidade médio aos 7, 28 e 90 dias.....	81
Quadro 23 - Resistência à tração média aos 28 dias	82
Quadro 24 - Resumo das propriedades geométricas	91
Quadro 25 - Massa volúmica das FAR.....	92
Quadro 26 - Resistência à tração média e característica.....	95
Quadro 27 - Dosagem dos BR FAR	97
Quadro 28 - Propriedades no estado fresco	102
Quadro 29 - Resistência à compressão aos 28 dias	104
Quadro 30 - Módulo de elasticidade aos 28 dias	107
Quadro 31 - Parâmetros obtidos para cada uma das séries.....	112

Quadro 32 - Propriedades dos materiais	115
Quadro 33 - Parâmetros obtidas através da análise inversa.....	116

1. Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

No contexto atual, a indústria da Construção Civil é um dos setores que mais contribui para a evolução das alterações climáticas e para o aquecimento global. Segundo as Nações Unidas, esta indústria foi responsável em 2018 por 36% do consumo de energia e 39% das emissões de CO₂, das quais 11% resultaram da extração e da produção de materiais como o aço e o cimento (IEA, 2019). Neste sentido, nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidas diversas políticas ambientais que incentivam a utilização de materiais obtidos a partir de resíduos e que limitam a extração de recursos naturais.

O betão caracteriza-se por ser o material mais consumido no mundo, com uma produção de 10 000 milhões de toneladas/ano, por conter materiais altamente poluentes, como é o caso do cimento, e por incorporar grandes quantidades de recursos naturais não renováveis na sua composição tradicional (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). De forma a colocar em prática as cada vez mais requeridas inovadoras políticas ambientais, os seus métodos de produção têm vindo a ser revistos, a fim de estabelecer um material sustentável, funcional e económico. A utilização de materiais reciclados ou de produtos obtidos através do processamento de resíduos, como por exemplo as escórias de aciaria, os cerâmicos, o vidro e as cinzas volantes, constitui uma solução auspiciosa do ponto de vista técnico e ambiental dado que reduz o consumo de materiais não renováveis, previne a deposição de resíduos em aterro e permite diminuir a emissão de gases poluentes para a atmosfera.

De facto, muitos estudos têm apresentado resultados bastante interessantes e satisfatórios com a incorporação de alguns destes materiais alternativos em betões comprovando que a inevitável substituição de alguns dos seus constituintes por outros materiais mais sustentáveis é viável e um caminho a calcorrear.

Os pavimentos industriais, por consumirem grandes quantidades de betão na execução de lajes térreas, poderão ser um dos setores que mais beneficiará desta transição. Porém, e pelo facto desta tipologia de estruturas ser correntemente negligenciada, e conseqüentemente ser frequente o aparecimento de patologias, aplicação neste tipo de estruturas deverá ser alvo de um cuidado especial.

Cumulativamente, o impacto ambiental da indústria pode também ser reduzido com a adoção de soluções mais sustentáveis ou resilientes que em último caso conduzam o tempo de vida útil maior da estrutura em causa. No caso dos pavimentos industriais, é comum introduzirem-se fibras de aço discretas para melhorar algumas propriedades mecânicas essenciais, nomeadamente, relacionadas com o seu comportamento pós-fissurado, conduzindo a um funcionamento mais adequado da laje de betão, nomeadamente, no que concerne ao controlo de fissuração e aumento da tenacidade. A melhoria destas propriedades, para além das questões relacionadas com as questões de durabilidade e performance, permitirá reduzir a espessura da camada de betão e, conseqüentemente, a quantidade de betão utilizado, contribuindo para uma solução mais ecológica.

A incorporação de fibras discretas em betões é comumente realizada com a utilização de fibras de aço industriais (FAI). No entanto, ao longo dos últimos anos, diversos investigadores têm explorado o potencial de utilização de fibras de aço provenientes da reciclagem de pneus no reforço do betão. A utilização destes resíduos permite reduzir impactos ao meio ambiente e à saúde pública associadas à deposição destes materiais em aterro. Na realidade, a deposição deste tipo de resíduo em aterro já é proibida por diretiva europeia desde o final da década de 90. Paralelamente, como os pneus são constituídos entre 5% a 15% por ligas metálicas de alta resistência e são consumidos em elevada escala, é possível obter fibras de aço recicladas (FAR) de boa qualidade e em grande quantidade (Alsaif et al., 2018).

É com base nestes pressupostos que surge o desenvolvimento desta dissertação, em que numa primeira fase se desenvolverá um conjunto de misturas com a inclusão de resíduos industriais como alternativas a alguns constituintes dos betões tradicionais, designadamente, agregados e ligantes, atendendo às especificações existentes nas diversas normas e manuais técnicos. Posteriormente, e com o objetivo de conferir algumas propriedades ao nível do comportamento pós-fissurado, ir-se-ão adicionar FAR à mistura desenvolvida com agregados da siderurgia e da indústria cerâmica.

1.2 Objetivos e metodologia

Este trabalho tem como principal objetivo a redução dos níveis de disposição de resíduos industriais ou provenientes da construção e da demolição de edifícios em aterros sanitários, através da sua

reutilização para desenvolvimento de soluções ou produtos para o setor da construção, em particular, focados numa aplicação em pavimentos industriais.

Numa primeira fase, para se cumprir este propósito, é pretendido desenvolver um conjunto de misturas alternativas recorrendo à utilização de resíduos e subprodutos, nomeadamente agregado siderúrgico inerte para a construção (ASIC) e resíduos cerâmicos. Posteriormente, realizou-se a caracterização das soluções desenvolvidas, seguindo as normas e diretrizes recomendadas. A caracterização dos betões será feita no estado fresco, através do ensaio de abaixamento, e no estado endurecido com recurso a um conjunto de ensaios, designadamente: i) avaliação do módulo de elasticidade, ii) ensaios à compressão uniaxial com determinação da relação tensão – extensão, e iii) ensaios à tração por compressão diametral.

Numa segunda fase, pretendeu-se avaliar os benefícios técnicos da utilização de fibras de aço recicladas, FAR, como reforço de uma das misturas com resíduos para a substituição de agregados naturais, anteriormente desenvolvida. Deste modo, procedeu-se inicialmente a uma caracterização geométrica e mecânica das fibras, sendo que posteriormente se realizaram misturas com diferentes percentagens de incorporação de fibras, com e sem tratamento.

Numa terceira fase, avaliaram-se as propriedades mecânicas das soluções desenvolvidas com a incorporação das FAR, tendo-se verificado se estas possuíam características adequadas para a incorporação pavimentos industriais. Foram realizados distintos ensaios laboratoriais, nomeadamente: i) ensaio de abaixamento para avaliar a trabalhabilidade no estado fresco, ii) ensaios à compressão uniaxial, com determinação da relação tensão - extensão ($\sigma - \varepsilon$), e iii) ensaios de flexão para determinar a relação força – flecha ($F - \delta$), a relação força – abertura de fenda (CMOD – *Crack Mouth Opening Displacement*) e conseqüentemente as respetivas resistências residuais à flexão. Finalmente, procedeu-se a uma análise inversa dos ensaios de flexão em três pontos para obter a lei de tração uniaxial a partir do ensaio de flexão.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos incluindo as referências bibliográficas.

O Capítulo 1 consiste, essencialmente, numa introdução, apresentando um enquadramento geral dos principais motivos de desenvolvimento da dissertação, os objetivos a alcançar, bem como a forma como a presente dissertação está estruturada.

O Capítulo 2 inicia-se com uma revisão bibliográfica sobre a temática dos pavimentos industriais abordando os seus componentes, as suas classificações e os métodos construtivos até hoje desenvolvidos. Posteriormente, é realizada uma descrição de alguns resíduos passíveis de serem incorporados no betão, bem como uma análise dos resultados obtidos noutros trabalhos experimentais. Finalmente, é feito um levantamento das diversas especificações que os demais constituintes dos pavimentos devem respeitar.

O Capítulo 3 apresenta e descreve o estudo efetuado para o desenvolvimento e caracterização das diversas formulações de betão com a inclusão de resíduos industriais para a substituição de agregados naturais, sendo detalhados os materiais, os objetivos e os ensaios efetuados, quer no estado fresco, quer no estado endurecido de cada mistura. São ainda apresentados os resultados obtidos durante a campanha experimental, fazendo uma comparação entres estes valores e os obtidos por outros autores, retirando conclusões sobre a variação de desempenho das misturas com a incorporação de diferentes resíduos.

No Capítulo 4 especifica-se a metodologia adotada para caracterizar as fibras aço recicladas de pneus usados, utilizadas para reforçar a composição de betão selecionada no âmbito dos estudos desenvolvidos no Capítulo 3. Inicialmente, foi realizada a caracterização geométrica e mecânica das fibras, seguindo-se a descrição de métodos de tratamento adotados para eliminar os materiais não metálicos presentes nas fibras. É apresentado o procedimento praticado na determinação do desenho das composições, bem como os resultados obtidos e a respetiva discussão dos mesmos.

Finalmente, o Capítulo 5 sintetiza as conclusões gerais do trabalho e apresenta algumas diretrizes e propostas de trabalhos futuros.

2. Estado de arte

2.1. Evolução do conceito de pavimento industrial

O termo "*pavimentos industriais*" surge em finais do século XVIII, com a revolução industrial, uma vez que, com a transição da produção manual para a produção por máquinas, novas infraestruturas emergiram devido a requisitos funcionais. As pequenas oficinas localizadas nas casas dos próprios artesãos foram substituídas por edifícios capazes de receber centenas de operários e equipamentos. Com esta alteração no paradigma da produção, surgiram diversos requisitos para os pavilhões industriais e para os seus pavimentos. Por um lado, a maquinaria utilizada exigia uma base de trabalho mais resistente, mais uniforme e com melhores propriedades mecânicas e por outro, os trabalhadores necessitavam de melhores condições para exercerem as suas funções de forma mais eficiente e segura.

Assim sendo, as primeiras indústrias a desenvolverem-se, como é o caso da indústria têxtil, utilizavam os materiais que estavam disponíveis na época, como por exemplo a madeira e os mosaicos cerâmicos como é demonstrado na Figura 1.

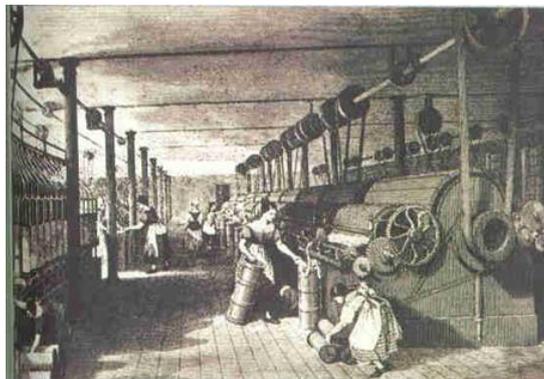


Figura 1 - Fábrica têxtil (<http://www.camilomarcelino.com/personagens/textil.jpg>)

O crescimento acelerado das indústrias levou a que novos requisitos surgissem. Desta forma, as indústrias pesadas, metalomecânica e siderúrgica por exemplo, passaram a empregar betonilhas e mais tarde massames de cimento (séc. XIX), pois estes tipos de materiais eram mais resistentes mecanicamente e ao fogo.

Apesar destes avanços tecnológicos terem melhorado a qualidade da indústria, continuavam a surgir muitos problemas relacionados com a ineficiência dos pavimentos. A utilização mais recorrente do betão simples no início do séc. XX permitiu atenuar algumas destas adversidades e começaram-se a executar lajes com espessuras elevadas e a dar maior importância ao acabamento da superfície, nomeadamente, à planimetria e nivelamento (João, 2014). Com a alteração dos materiais e com a introdução de novas técnicas construtivas, muitas das patologias até então verificadas deixaram de ocorrer com tanta frequência. Porém, o reduzido período de vida útil do pavimento, continuava a ser uma fonte de preocupação.

A baixa longevidade dos pavimentos devia-se essencialmente à falta de conhecimento dos fenómenos físicos e mecânicos do betão, como a fendilhação e a retração, bem como da baixa resistência aos esforços de tração que a matriz do betão apresentava. Estes fatores originavam dimensionamentos incorretos que conduziam a patologias. Cumulativamente a isto, desconhecia-se a importância do sistema de apoio destes pavimentos, ou seja, o solo. O substrato ao ser um meio compressível e não-uniforme tornava-o também num fator que contribuía para a diminuição da vida útil do pavimento.

Para agravar a situação, durante este século desenrolaram-se duas guerras mundiais que aceleraram o crescimento e o desenvolvimento tecnológico de outras indústrias, o que provocou muitos condicionalismos nas instalações fabris, nomeadamente, devido à falta de preparação dos pavimentos para o tráfego pesado e para o aumento das cargas movimentadas e armazenadas (Ribeiro, 2016).

O avanço tecnológico que era exigido para solucionar estas contrariedades tardava em chegar e, ao contrário de outras indústrias, a construção civil continuava a utilizar técnicas muito rudimentares. Até aos anos 60, as centrais de betão pronto e os respetivos meios de transporte não tinham sido ainda suficientemente desenvolvidos para serem usados regularmente. Como tal, as obras de construção até então, dependiam da produção de betão em obra. As betonagens de pavimentos térreos eram efetuadas em pequenas áreas e com recurso a painéis de cofragem com o intuito de seccionar a área a betonar. Os painéis adjacentes eram conectados com recurso a elementos de transferência de carga colocados nas juntas, por ferrolhos de aço ou ligações do tipo “macho-fêmea”.

Foi só nos anos 70 que existiram avanços significativos neste campo de trabalho, muito devido aos aspetos semelhantes que foram verificados entre os pavimentos rodoviários e os pavimentos térreos. Desta forma, começaram-se a utilizar novos métodos de dimensionamento e a adotar processos construtivos diferentes em relação aos que até então eram utilizados. Dos dois tipos de pavimentos rodoviários existentes, flexíveis e rígidos, estes últimos eram os que apresentavam maiores semelhanças

de comportamento em relação aos pavimentos térreos, ao nível da constituição da laje e dos efeitos das ações sobre o pavimento (Deacon, 1986). Com este avanço de conhecimento e com o auxílio da disseminação das centrais de betão pelo país, os pavimentos industriais térreos executados com betão começaram a ter uma presença relevante no portefólio deste tipo de infraestruturas.

O aumento exponencial de produção verificado na construção civil levou à Comissão das Comunidades Europeias a elaborar, na década de setenta, um conjunto de regras técnicas harmonizadas para o projeto estrutural de edifícios e de outras obras de engenharia civil, que passaram a ser conhecidos correntemente por Eurocódigos Estruturais. No entanto, nestas normativas visam principalmente lajes em altura, não existindo regulamentação específica para pavimentos térreos. Noutras regiões do globo, em virtude do reconhecimento que esta tipologia de estruturas é muitas vezes negligenciada, surgem múltiplos documentos como são exemplo o manual técnico *TR 34 – Industrial Ground Floor*, da norma americana *ACI 360R – 06*, e o manual técnico americano *TM 5-809-1/AFM 88-3*, entre outros.

Apesar de existirem diversas normativas, recomendações e manuais técnicos, continuam ainda hoje a surgir elevadas patologias nos pavimentos. A responsabilidade da ocorrência destes contratempos é dividida entre clientes, projetistas e construtores. Segundo Antunes & Barros (2003), tal deve-se a deficiente empenho dos intervenientes na conceção, projeto e construção deste tipo de estruturas, muitas vezes associado ao sentimento de que a não verificação dos estados limites de utilização e últimos não está diretamente ligado à ocorrência de acidentes trágicos. Porém, é reconhecido que, em muitos casos, o deficiente funcionamento deste tipo de estruturas conduz a prejuízos económicos significativos e, por vezes, a acidentes envolvendo seres humanos.

Atualmente, a indústria da construção tenta introduzir rigor, sofisticação, conhecimento e sustentabilidade a este nicho de mercado com o intuito de obter trabalhos que preencham os requisitos exigidos e, ainda que indiretamente, a economia de um certo país possa crescer já que os pavimentos industriais são a base de trabalho de imensuráveis setores económicos.

2.2. Componentes dos pavimentos industriais

A TR-34 (2018) defende que o *"desempenho de um pavimento industrial resulta de um processo de planeamento integrado e detalhado que se centra na utilização atual e futura do pavimento, da qualidade do seu dimensionamento, das suas especificações e das técnicas utilizadas durante a sua construção e*

que, com a realização de inspeções e manutenções periódicas, é possível assegurar o desempenho em serviço do pavimento durante a sua vida útil".

Outros autores, como é o caso de João (2014) e de Ribeiro (2016), especificam ainda que a interação entre a laje e os materiais de suporte é fundamental para o funcionamento adequado de todo o pavimento. Camadas essas que, apesar de serem realizadas em momentos distintos, funcionam como um conjunto de mecanismos integrados num único sistema construtivo, Figura 2.

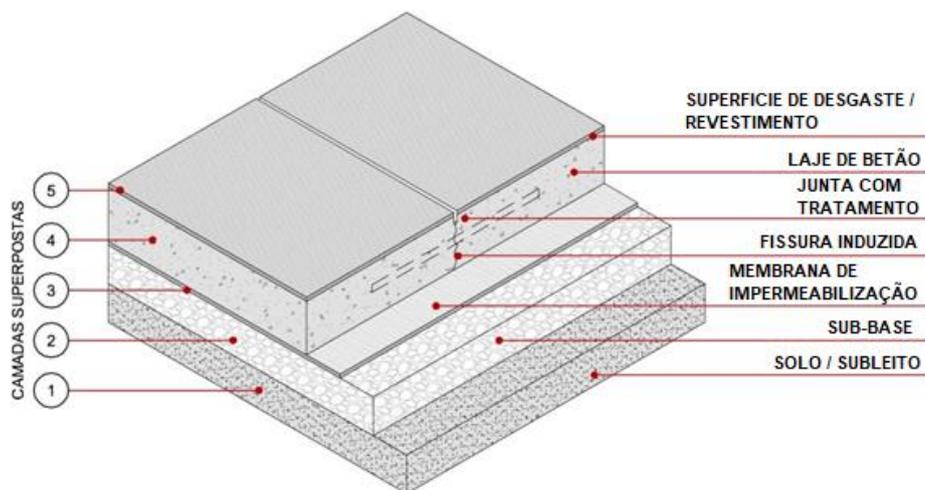


Figura 2 - Sistema construtivo de um pavimento industrial [adaptado de Cristelli (2010)]

Este sistema é composto por um conjunto de camadas com especificidades diferentes cuja composição poderá diferenciar em alguns casos singulares, porém, a constituição mais corrente é a seguinte: solo de fundação ou subleito, sub-base, filme plástico ou membrana de impermeabilização, laje de betão e uma última camada que se designa por superfície de desgaste ou revestimento.

2.2.1. Solo ou subleito

O termo solo é usado em várias aceções conforme o ponto de vista, científico ou técnico. De acordo com as especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), solo é todo o conjunto natural de partículas que podem ser separadas por agitação em água.

A principal função do solo é absorver as solicitações de cargas impostas ao pavimento. Todavia, para o seu correto funcionamento é necessário que este contemple um conjunto de propriedades relacionadas essencialmente com a resistência e a deformabilidade. O manual técnico TM 5-809-1/AFM 88-3 (1987)

defende a realização de uma investigação minuciosa ao solo, com vista à caracterização dos parâmetros geomecânicos sempre que for economicamente viável. A TR-34 (2018) recomendação técnica produzida pela “*Concrete Society*” para a construção e projeto de pavimentos industriais, acrescenta ainda que a caracterização do solo deve-se guiar pelo Eurocódigo 7 (EN 1997-1), com o intuito de obter todos os parâmetros necessários para o dimensionamento do pavimento.

A capacidade do solo para suportar cargas está diretamente relacionada com o grau de compactação, já que o solo ao atingir um grau de compactação mais elevado, conseqüentemente, o número de vazios do solo diminui o que conduz a uma maior área de contacto entre as partículas sólidas. Além disso, o solo estará menos suscetível de sofrer assentamentos e dificultará a passagem da água, ou seja, a probabilidade de existir um colapso da estrutura geotécnica devido ao arraste das partículas mais finas diminui.

Para determinar as propriedades do solo são comumente utilizados, *in situ*, os seguintes ensaios:

- California Bearing Ratio (CBR);
- Ensaio de carga em placa;
- Standard Penetration Test (SPT);
- Dynamic Probing (DP);
- Cone Penetration Test (CPT) e Piezocone Penetration Test (CPTU).

O módulo de reação do solo, fator k , definido por Westergaard, representa a carga por unidade de área que causa um assentamento unitário no solo. Este fator não deve ser considerado exclusivamente dependente do solo, sendo necessário admitir a influência adicional da natureza e localização da carga aplicada, das características mecânicas e geométricas da laje e até mesmo da solidarização entre os diversos painéis (Nota técnica 52/90, 1990). Assim, o módulo de reação do solo é um dos fatores com maior importância no âmbito deste estudo, visto que é com ele que podemos determinar o risco de assentamento a longo prazo da laje. Os solos coesivos, como é o caso das argilas e dos sedimentos, são os que apresentam maior risco de assentamento, podendo apresentar assentamentos diferenciados caso haja assimetrias no carregamento da laje. Neste cenário, o pavimento irá apresentar inúmeras irregularidades, o que não é de todo desejável.

Na construção de pavimentos térreos é fortemente recomendado que o valor do fator do módulo de reação do solo seja determinado através do ensaio de carga com uma placa, segundo Ribeiro (2016). A própria TR-34 (2018) refere que este ensaio é mais preciso no caso de se usarem placas com maior

dimensão, i.e., 750 mm de diâmetro, dado que estas dimensões simulam de forma mais adequada as pressões exercidas pelas lajes apoiadas no solo. O mesmo manual técnico refere ainda que, caso se usem placas com um diâmetro inferior, deve-se empregar um fator de correção / conversão.

As sondagens SPT e DP são utilizados para avaliar em profundidade as características dos maciços terrosos. O ensaio DP caracteriza-se por ser um ensaio simples e económico, não requer mão de obra especializada e permite a distinção dos distintos zoneamentos geotécnicos. O ensaio SPT diferencia-se do ensaio DP por permitir a extração de amostras e por existir muita experiência proveniente de ensaios antigos de onde resultaram inúmeras correlações empíricas com distintos parâmetros geotécnicos.

Por fim, do ensaio CPT é possível obter a resistência de ponta e a resistência lateral do subleito. Por outro lado, do ensaio CPTU obtêm-se os mesmos parâmetros do ensaio CPT e ainda a pressão intersticial exercida pela água. Estes dois ensaios são considerados como uma das mais importantes ferramentas de prospeção geotécnica a nível internacional, tendo como principal objetivo a determinação da resistência do solo e de rocha branda à penetração de um cone e o atrito de uma manga (Ribeiro, 2016).

2.2.2. Sub-base

Como é possível observar na Figura 2, esta camada está localizada entre a laje e o subleito e, segundo o manual técnico TR-34 (2018) esta camada tem três funções principais:

- Transmitir as cargas aplicadas na laje de forma apropriada para o solo;
- Providenciar uma camada nivelada para a construção da laje; e
- Providenciar uma plataforma de trabalho adequada para a atividade da construção civil.

Paralelamente a isto, a adoção de uma sub-base estável pode corrigir as deficiências do subleito, proporcionar um melhor comportamento do pavimento e evitar os efeitos dos solos expansivos. Assim sendo, o uso de uma sub-base é muitas vezes uma solução económica para mitigar algumas imperfeições que possam existir num subleito com fracas características.

Esta camada pode ser classificada como sub-base granular ou tratada. As sub-bases granulares podem ser abertas, no caso de ausentarem uma ou mais granulometrias, ou fechadas caso a faixa de diâmetro dos agregados seja mais ampla. A granulometria dos agregados deve ser definida adequadamente, já que esta tem influência não só na capacidade resistente, mas também na capacidade de drenar água. De acordo com Cristelli (2010), as sub-bases granulares abertas permitem rápido escoamento das águas, enquanto as de granulometria fechada, ou seja, de granulometria mais densa

são mais indicadas para áreas cobertas onde o risco de existir água é menor. Neste tipo de sub-bases deve-se dar especial atenção à compactação e ao controlo da utilização de materiais não-expansivos.

Por outro lado, as sub-bases podem ser tratadas com cimento ou com outros aditivos como a cal, pozolanas, o asfalto ou aditivos químicos. Estas sub-bases ao serem sujeitas a estes tratamentos, melhorarão algumas das suas propriedades, nomeadamente expansibilidade, plasticidade e resistência, reduzindo a carga transmitida ao solo (Passos, 2011).

Por fim, devido às crescentes preocupações ambientais, o uso de material reciclado nas camadas de sub-base tem vindo a ser cada vez mais recorrente. Alguns destes resíduos são o ASIC, os agregados reciclados provenientes de misturas betuminosas e os agregados que provêm da construção, demolição e renovação de edifícios. Com esta solução inovadora, é possível diminuir a utilização de recursos naturais e diminuir a quantidade de resíduos em aterros.

2.2.3. Filme plástico ou membrana de impermeabilização

As membranas têm como principal objetivo reduzir o atrito entre a laje de betão e a camada de sub-base (TR-34, 2018). Cumulativamente, esta membrana tem por objetivo impedir a ascensão de humidade proveniente das camadas inferiores, a passagem de finos, bem como a perda de água para a sub-base aquando da betonagem da laje (Figura 3). Geralmente, estas membranas são constituídas por filmes de polietileno, que segundo a TR-34 (2018), devem ser dispostas sobre a sub-base sem deixar vinco e deixando-as sobrepostas pelo menos 300 mm nas bordas.

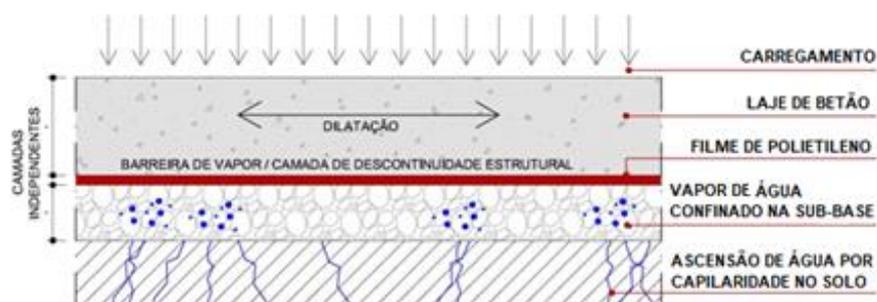


Figura 3 - Filme plástico [adaptado de Cristelli (2010)]

2.2.4. Laje de betão

Esta camada é a que irá receber e absorber a maioria das solicitações impostas ao pavimento. Assim, a laje de betão é o principal elemento do sistema e o que possui o maior número de requisitos.

Esta camada requer especial atenção aquando do seu dimensionamento e construção pois, caso contrário, surgirão inúmeras patologias que poderão colocar em risco a funcionalidade do pavimento. Visto que o betão simples possui reduzida ductilidade e resistência à tração, a adoção de sistemas de reforço tem vindo a ser difundida no meio técnico. Estes sistemas permitem aumentar a resistência do compósito, controlar eficientemente problemas de fissuração originadas pela retração e reduzir o número de juntas, que segundo Antunes & Barros (2003), são a causa mais corrente das patologias observadas nos pavimentos.

No dimensionamento da laje de betão, um dos elementos primordiais a abordar são os tipos de solicitações aos quais os pavimentos estarão sujeitos. O Quadro 1 elenca os tipos de carregamentos correntemente impostos em pavimentos industriais.

Quadro 1 – Tipos de carregamento

Ações indiretas					Ações diretas			
Retração			Dilatação térmica	Empenamento ou curling	Móveis	Estáticas		
Secagem	Autogénea	Plástica				Distribuídas	Concentradas (pontuais)	Lineares

As ações indiretas, embora provoquem tensões internas que podem prejudicar o seu desempenho, não são usualmente consideradas no dimensionamento da laje. Estas ações são tidas em conta na especificação dos materiais, selecionando aqueles que tenham propriedades de combate a este tipo de ações, bem como na seleção de métodos construtivos adequados, como por exemplo controle da área das placas e conseqüentemente da quantidade de juntas no pavimento e nos procedimentos de cura do material. O objetivo principal das juntas é permitir a movimentação (retração e dilatação) do betão sem que ocorra a sua fissuração e a finalidade da cura é garantir que existe água necessária para hidratar continuamente o cimento.

A retração é uma das ações indiretas impostas nos pavimentos industriais e a sua importância está associada à fissuração provocada pela mesma. A TR-34 (2018) define-a como sendo uma “*redução no tamanho ou no volume do betão, que pode conduzir o betão à fendilhação*”. Como mencionado no

Quadro 1, a retração pode ser por secagem (perda de água), autogénea (redução do volume de produtos no processo de hidratação) e plástica (ocorre antes do final de presa). Na prática é muito difícil distinguir cada um dos tipos de retração visto que acontecem simultaneamente.

Relativamente à retração por secagem, a mais comum nos pavimentos industriais, os fatores que mais influenciam este fenómeno são o volume de betão e a quantidade de água existente no mesmo (TR-34, 2018). A mesma fonte indica ainda que a quantidade de cimento e de água deve ser a menor possível e o valor máximo do rácio entre a água e o cimento (a/c) não deve ultrapassar os 0,55 de forma a evitar um aumento da retração.

A retração plástica surge quando temos uma secagem rápida da superfície exposta da laje de betão e acontece quando a taxa de perda de água da superfície, por evaporação, excede a taxa disponível de água por exsudação. Durante a fase plástica, o betão apresenta baixa resistência à tração, e as fissuras podem facilmente aparecer nestas situações (*Boletim Técnico ANAPRE*, n.d.). Uma forma de controlar este fenómeno é evitando a exposição solar direta, assim como evitando a realização de betonagens em dias muito quentes. Caso não seja possível contornar estes fatores, deve-se utilizar um retardador de presa.

Se a retração fosse livre, não existiriam esforços, apenas redução de volume, porém, o atrito entre a laje de betão e a sub-base impede a deformação, induzindo tensões de tração na laje. A Figura 4 exemplifica este fenómeno e a forma como a membrana reduz estas tensões.

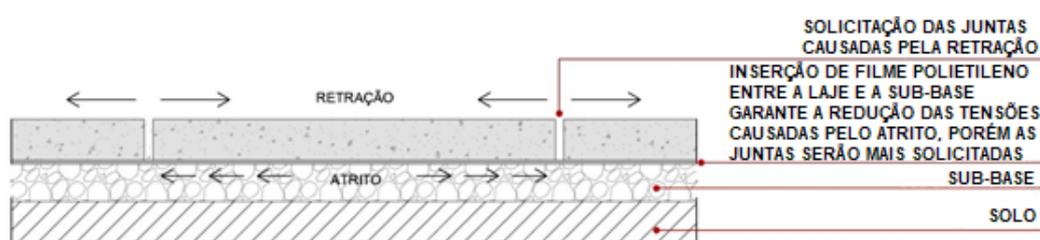


Figura 4 - Retração do betão [adaptado de Cristelli (2010)]

Outro tipo de ação indireta ao qual os pavimentos estão sujeitos é a dilatação térmica, que se define por ser uma variação do volume em função da temperatura ambiente, que origina tensões de tração e compressão nas placas e também nos elementos adjacentes (Cristelli, 2010). As juntas, quando bem

executadas e devidamente posicionadas, permitirão que o betão consiga variar de volume sem originar tensões nos elementos adjacentes.

Por fim, o empenamento ou *curling* é a distorção de um elemento originalmente linear ou plano devido, essencialmente, a gradientes de temperatura e/ou humidade ao longo da espessura do pavimento, Figura 5. Quando a superfície superior do pavimento tem uma temperatura e uma humidade diferente da superfície inferior, a laje empena fazendo os seus bordos levantar ou baixar conforme a direção do gradiente. A possibilidade de ocorrência de *curling* aumenta com a diminuição da espessura do pavimento, com o aumento da distância entre juntas de controlo de fendilhação, com a diminuição da eficácia de transferência de carga entre painéis adjacentes e com processos inadequados de cura do betão (Antunes & Barros, 2003).

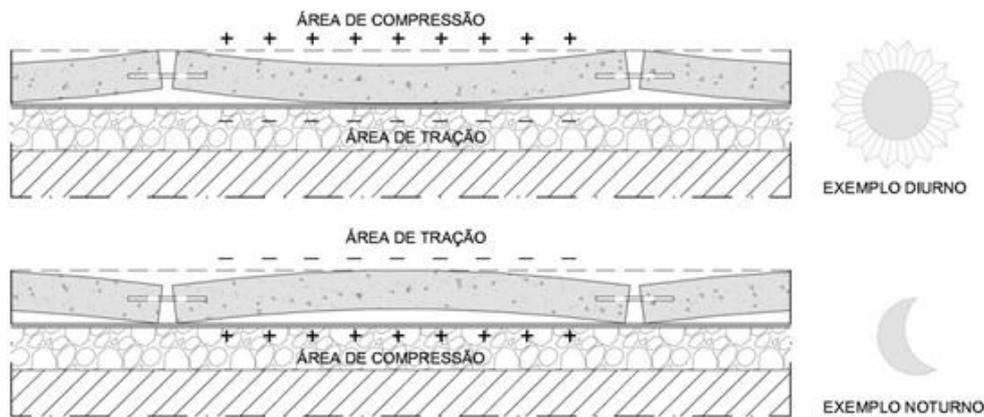


Figura 5 - Empenamento ou Curling (Cristelli, 2010)

As ações diretas associam-se a cargas aplicadas à estrutura e devem ser consideradas no dimensionamento estrutural do pavimento. Segundo a TR-34 (2018), os carregamentos agrupam-se em dois conjuntos: estáticos ou móveis. Em qualquer um dos casos, é fundamental que o tipo de carregamento esteja bem definido para que o projetista possa selecionar a melhor solução estrutural e construtiva.

Os carregamentos estáticos podem ser subdivididos em pontuais, lineares ou distribuídos consoante a área de aplicação das ações. Este tipo de carregamentos remete para zonas de armazenamento de paletes (cargas distribuídas), para paredes apoiadas sobre a laje (cargas lineares) e para bases de estantes ou mezanino (cargas pontuais).

Os carregamentos móveis provêm do tráfego de veículos e caracterizam-se por serem de curta duração e de frequência elevada e atraem maiores fatores de segurança na concepção, conseqüentemente. Neste contexto, deve ser feita uma análise do tráfego e das características dos veículos, como por exemplo a rigidez dos rolamentos e distância entre eixos, a fim de evitar a fadiga do pavimento. Geralmente, a circulação de máquinas provoca uma degradação precoce das juntas. Assim sendo, devem-se adotar medidas de mitigação, como por exemplo, posicionar, sempre que possível, as juntas em locais com reduzido tráfego e, caso não seja possível adotar esta medida, uma proteção adequada das juntas deve ser feita.

Relativamente aos modelos comumente utilizados no dimensionamento das lajes dos pavimentos industriais, o ACI 360R-10 (2010) refere que a análise da laje de betão pode ser feita com recurso ao modelo elástico-linear isotrópico, com recurso a uma análise elástica linear de lajes finas ou com recurso a uma análise elástico-plástica de lajes. Cumulativamente a estes modelos, pode-se também realizar uma análise numérica baseada no método dos elementos finitos. Este último método baseia-se na equação diferencial clássica de uma placa elástica fina em repouso num subleito elástico para representar a laje de um pavimento térreo. A aplicação deste método é limitada pois a equação diferencial sustenta-se em materiais homogéneos e contínuos e, uma vez que as lajes possuem descontinuidades devido às juntas e fissuras e o subleito raramente é uniforme, inviabilizam este modelo.

2.2.5. Superfície de desgaste ou revestimento

O acabamento superficial tem como função assegurar o desempenho do pavimento durante a sua vida útil bem como, dotar a superfície de características que colmatem necessidades específicas. Com o alisamento, aplicação de agentes aspersores ou endurecedores de superfícies é possível assegurar a resistência à abrasão desejada, a remoção de imperfeições, nivelar e planar para garantir boas condições de circulação e impermeabilizar a superfície contra a ação de agentes agressivos.

Consoante o resultado desejado, aplicam-se técnicas e materiais diferentes. Se o objetivo é obter uma superfície rugosa e com uma textura específica utilizam-se processos mecânicos ou aspersão de agregados de alta resistência. Este produto é depositado no betão ainda em estado fresco e é produzido à base de cimento Portland e apresenta a vantagem de poder conter aditivos pigmentados. Por outro lado, se se pretende impermeabilizar e aumentar a resistência à abrasão aplicam-se líquidos endurecedores. Esta propriedade mecânica, resistência à abrasão, pode também ser incrementada com

argamassas cimentícias de alta resistência. No entanto, em armazéns comuns, se o betão for de boa qualidade, raramente existem problemas de resistência à abrasão (TR-34, 2018).

Outro revestimento que importa referir é constituído pelos revestimentos de alto desempenho. Estes revestimentos reforçam e protegem as camadas de betão contra o ataque químico, mecânico e bacteriológico, conferindo a rugosidade e aspeto visual desejados, proporcionando ainda uma limpeza adequada (Passos, 2011).

2.3. Classificação dos pavimentos industriais

Os elementos que constituem o sistema base dos pavimentos industriais podem variar consoante as funcionalidades e requisitos solicitados. Com o propósito de alargar a durabilidade, de melhorar as características e a qualidade do pavimento, engemham-se alterações no sistema, salvaguardando que a solução final é economicamente viável e sustentável. No entanto, para obter este resultado é preciso um conhecimento profundo das características das diferentes tipologias de pavimento que podem diversificar quanto ao tipo de fundação, quanto ao tipo de reforço estrutural e quanto ao tipo de utilização.

2.3.1. Classificação consoante a fundação

Segundo Rodrigues et al. (2006) os pavimentos podem ser classificados, de acordo com a fundação, nomeadamente, em fundação direta ou profunda.

Os pavimentos com fundação direta são aqueles que se apoiam diretamente no solo ou, caso exista, na sub-base. Assim, a fundação terá de possuir uma capacidade portante admissível compatível com as cargas previstas no pavimento.

No caso de a capacidade resistente da fundação ser inferior à solicitação prevista, o pavimento em vez de se apoiar na base ou na sub-base, deve apoiar-se em estacas (Figura 6). Neste caso, assume-se que o apoio a longo prazo da laje é fornecido unicamente pelas estacas e não pela sub-base.

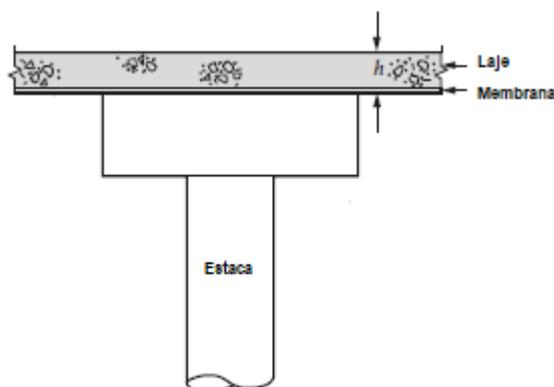


Figura 6 - Exemplo de laje apoiada em estacas [adaptado de TR-34 (2018)]

2.3.2. Classificação consoante o reforço estrutural

Pavimentos de betão simples

Este tipo de laje não contém qualquer tipo de reforço, pelo que, o seu dimensionamento baseia-se em determinar a espessura ideal da laje de betão para que o surgimento de fissuras não ocorra. Sem o auxílio de sistemas de reforço, apenas o betão poderá resistir aos esforços atuantes, o que torna a laje bastante espessa para corrigir a baixa resistência a esforços de tração que o betão possui. O surgimento de fissuras é evitado através juntas serradas idealizadas para induzir a fissuração em pontos específicos, combatendo deste modo, a retração, a dilatação térmica e o efeito de *curling*.

Neste tipo de pavimentos podem ser adicionados elementos de transferência de carga para melhorar o desempenho do pavimento. Segundo Cristelli (2010), estes elementos não descaracterizam o pavimento, pois as barras de aço não trabalham como armadura, sendo apenas utilizadas para transferir esforços entre placas. O mesmo autor refere ainda que este tipo de pavimento apresenta um processo executivo bastante simplificado, mas que tem menor resistência e menor durabilidade que os restantes tipos de pavimentos.

Betão reforçado com armadura convencional ou malha eletrossoldada

Um dos objetivos da utilização de betão armado nos pavimentos é corrigir a reduzida resistência à tração do betão, limitar a largura das fendas que surgem nas placas (ACI 360R-10, 2010) e, simultaneamente, reduzir o número de juntas (Cristelli, 2010). Para obter estes resultados é necessário posicionar as malhas no terço superior da laje salvaguardando um recobrimento mínimo de 5 cm.

Durante este processo construtivo, são realizadas interrupções nas armaduras para dispor as juntas serradas para controlo da fissuração. Nestes locais, devem ser por isso empregues elementos de transferência de carga (Figura 7).

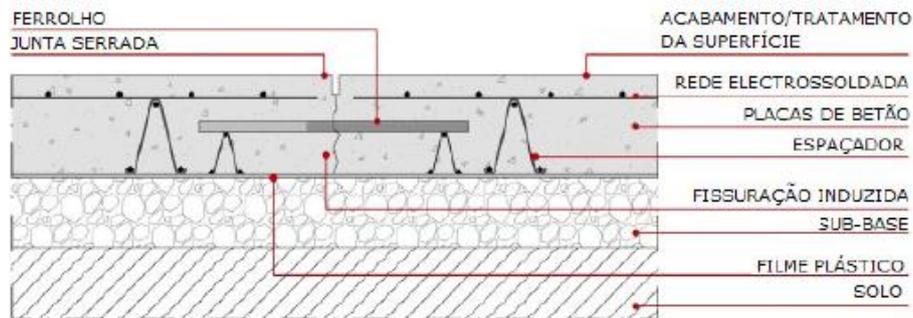


Figura 7 - Pavimento reforçado com rede eletrossoldada (Passos, 2011)

De acordo com Cristelli (2010), para além do controlo de fendilhação, estes sistemas de pavimentos também são implementados para incrementar resistência ao pavimento em áreas com carregamentos elevados ou em solos com baixa resistência. Neste caso, deverão existir duas camadas de armaduras. As que irão auxiliar a resistência à tração devem ser posicionadas na parte inferior do pavimento visto que é o local onde os esforços de tração se localizam e as restantes armaduras deverão ser posicionadas na parte superior para controlo da fendilhação (Figura 8).

A TR-34 (2018) menciona que, no caso de a armadura estar posicionada na parte superior da laje, o dimensionamento deve ser realizado como se o pavimento não tivesse qualquer armadura, i.e., betão simples. Caso a armadura esteja na parte inferior, o dimensionamento já tem em consideração a área de armadura.

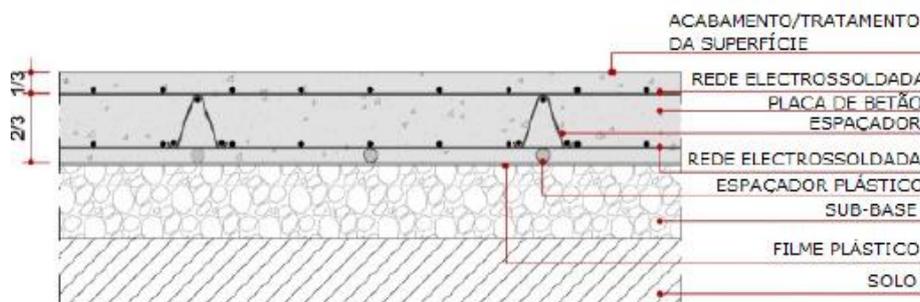


Figura 8 - Pavimento com reforço estrutural (Passos, 2011)

Pavimentos de betão pré-esforçado com armadura pós-tencionada

Esta técnica consiste em introduzir no pavimento um estado de tensão permanente com o objetivo de melhorar o seu comportamento em serviço e, também, a sua resistência. Desta forma, o número de juntas e a espessura da laje pode ser reduzido, segundo a recomendação CCAA T48 (2009).

No sistema de pós-tensão, as armaduras são tensionadas depois do betão ter adquirido a resistência necessária. Este sistema pode ser subdividido em pós-tensionado com aderência, caso os cabos de pré-esforço estejam aderentes ao betão, ou pode ser sem aderência no caso de as armaduras de pré-esforço estarem desligadas da peça de betão. Em qualquer uma das hipóteses, esta técnica é bastante complexa e por sua vez bastante dispendiosa pelo que, os Donos de Obra raramente equacionam utilizar este tipo de pavimentos apesar de oferecerem inúmeras vantagens.

Pavimentos de betão reforçado com fibras (BRF)

Designa-se betão reforçado com fibras (BRF) a um betão no qual se introduzem fibras, dispersas, discretas e dispostas de forma aleatória. O estudo de BRF pode não ser semelhante ao estudo efetuado para um betão simples ou armado, uma vez que a distribuição de fibras no betão proporciona propriedades resistentes tendencialmente mais isotrópicas que não são comuns nos restantes tipos de betões, isto é, com armadura convencional. Ou seja, os BRF apresentam a mesma capacidade resistente, tanto para ações que lhes induzem trações na face superior como para ações que lhes induzem trações na face inferior, admitindo que a distribuição das fibras é uniforme e não existem efeitos de segregação.

Existem atualmente no mercado diversos tipos de fibras possíveis de serem incorporadas no betão, nomeadamente, as fibras de aço, polipropileno, carbono, vidro e naturais, sendo que tais fibras podem ser classificadas em micro e macro fibras. O ACI 544.2R-17 (2017) classifica os BRF consoante o tipo de fibra utilizado, ou seja, fibras metálicas, fibras de vidro, fibras naturais e fibras sintéticas que inclui as fibras de carbono. Deste modo, o desempenho do betão reforçado com fibras está diretamente relacionado com o tipo de fibra, com as propriedades mecânicas e com as características geométricas das fibras. Com a introdução das fibras o betão pode melhorar a capacidade de absorção de energia, a ductilidade e a resistência às ações dinâmicas, de fadiga e de impacto, e conseqüentemente reduzir o número de juntas e a espessura da laje. Além disto, este compósito, apesar de apresentar um maior número de fendas, estas apresentam menor abertura devido à capacidade de as fibras controlarem este

fenômeno. Por fim, os BRF são mais céleres e mais fáceis de aplicar visto que não existe a necessidade de executar a dobração e a amarração das armaduras.

Das inúmeras opções de fibras existentes, as fibras de aço são as mais frequentemente utilizadas para aumentar a resistência residual pós-fissurada do compósito, bem como aumentar a absorção de energia do material, abertura de fissura resistência ao impacto entre outras propriedades (Figura 9).

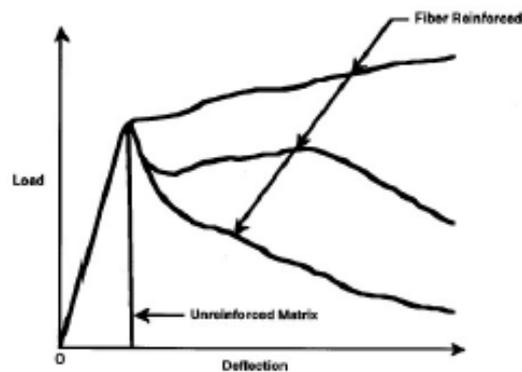


Figura 9 - Curvas típicas tensão-deformação: betão convencional e BRF (ACI 544.1R-96, 2009)

Todo este conjunto de fatores tornam a utilização de fibras no betão muito atrativa, principalmente, em estruturas com elevado grau de hiperstaticidade como é o caso dos pavimentos térreos. Todavia, para tirar proveito de todo o potencial deste material, é necessário um conhecimento profundo das alterações que a adição de fibras causa nas propriedades do betão. O estudo e revisão pormenorizada das propriedades do BRF, será analisado na secção 2.4.7.

2.3.3. Classificação consoante o tipo de utilização

A utilização prevista para um dado pavimento poderá influenciar o nível de rigor e de detalhe que se deve ter durante o dimensionamento e a construção deste sistema. Como tal, é preciso classificar os pavimentos consoante o tipo de utilização para que a escolha dos materiais e técnicas construtivas seja a mais adequada às necessidades do utilizador.

Consoante o tipo de tráfego a que os pavimentos irão estar sujeitos, o ACI 302.1R-15 (2015) atribui classes aos sistemas. Existem 9 classes, sendo que apenas as classes 5, 6 e 7 dizem respeito a pavimentos industriais. As restantes são para passeios, pisos de garagem, escritórios, entre outros. A classificação e as considerações realizadas neste documento encontram-se resumidas no Quadro 2.

Quadro 2 - Classe dos pavimentos consoante a utilização [adaptado de Passos (2011)]

Classe	Tipo de tráfego previsto	Uso	Considerações especiais	Acabamento final
5	Veículos industriais com rodas pneumáticas	Pavimentos industriais - zonas de produção e armazenamento	Solo bem executado e uniforme	Intensivo realizado com talocha mecânica
			Executar juntas necessárias	
			Garantir resistência à abrasão	
			Cura adequada	
6	Veículos industriais pesados com rodas rígidas	Pavimentos industriais sujeitos a tráfego pesado, podendo sofrer impactos de cargas	Igual ao anterior	Aplicação de endurecedores de superfície
			Garantir sistema de transmissão de cargas	Uso intensivo de talocha mecânica
7	Veículos industriais pesados com rodas rígidas	Pavimentos com camadas superficiais, aplicadas em segunda fase, sujeito a tráfego intenso e impacto	Camada de betão: bem executado e uniforme; recurso a reforço; execução de juntas necessárias; condições de cura adequadas; superfície adequada	Preparação da superfície para receber todas as operações necessárias ao acabamento superficial
			Camada superficial: endurecedor de superfície mineral ou metálico aplicado à camada superficial; condições de cura adequadas	Uso intensivo de talocha mecânica

Para além da classificação previamente mencionada do *American Concrete Institute*, ACI, existe uma outra classificação brasileira idealizada pela *Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho*, ANAPRE, que abrange cinco principais classes: áreas industriais, áreas de armazenamento, vias de circulação e pavimentos urbanos e rodoviários, os pisos de estacionamento e comerciais. As considerações relativas ao sistema de classificação dos pavimentos quanto à utilização segunda a ANAPRE encontram-se resumidas no Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação dos pavimentos de acordo com ANAPRE (Passos, 2011)

Uso	Considerações especiais
Áreas industriais	Piso como equipamento para produção
	Pisos sujeitos a várias perturbações provenientes de infraestruturas diversas, que por vezes impedem recurso a determinados tipos de soluções
	Numerosas mudanças de layout de equipamentos
	Comum utilização de RAD não só por razões estéticas, mas também por proteção e limpeza
Vias de Comunicação e pavimentos rígidos	Vias de comunicação pertencentes a indústrias e indispensáveis ao seu funcionamento, áreas de estacionamento, entre outros
	Sujeitos a cargas pesadas e a tensões de origem térmica bastante elevadas pois geralmente este tipo de pavimentos encontram-se ao ar livre
	Espessuras superiores a 14 cm, quando o pavimento é reforçado
Áreas de armazenamento	Piso como equipamento
	Recurso a pisos estruturalmente armados, com fibras de aço ou pré-esforçados de modo a reduzir o número de juntas
	Aplicação de endurecedores de superfície para aumentar a resistência à abrasão

2.4. Betões com resíduos para incorporação em pavimentos industriais

No último século, o aumento da produção de materiais a nível mundial cresceu 800% significando isto que, se consomem por ano 60 000 milhões de toneladas (Pacheco-Torgal, 2013), sendo que um sexto deste valor, 10 000 milhões de toneladas, devem-se à produção de betão, tornando-o no material mais consumido do Planeta Terra (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). Devido à sua versatilidade, baixo custo e boas propriedades, o betão continuará a ser consumido em grande escala no curto e médio prazo. No entanto, devido às crescentes preocupações ambientais, diversos estudos têm vindo a ser realizados na tentativa de analisar quais os benefícios e as limitações do reaproveitamento de diversos resíduos, como por exemplo resíduos de indústrias cerâmicas, escória de aciaria negra e Resíduos de Construção e Demolição (RCD), como alternativas às matérias-primas até agora utilizadas. Alguns destes resíduos, nomeadamente o agregado siderúrgico inerte para a construção, vulgarmente designado de ASIC, assim como os resíduos cerâmicos, podem ser adicionados não só como agregados, mas também poderão ter potencial de funcionarem como ligantes sustentáveis e/ou adições e, eventualmente, substituir o cimento Portland e cinzas volantes. Muito recentemente, a falta de cinzas volantes, devido ao encerramento das centrais termoelétricas a carvão, tem estabelecido novos desafios na área do desenvolvimento de betões, sendo que a inclusão destas adições possibilitava a diminuição do consumo de um material com pegada ambiental muito elevada, como é o caso do cimento Portland, para além de conduzir a outros benefícios relacionados com a obtenção de matrizes mais compactas. Os constituintes dos pneus apresentam

igualmente elevado potencial para serem reaproveitados. Este material, que é gerado em grandes quantidades, tem na sua constituição ligas metálicas de elevada resistência que podem ser introduzidas no betão como substitutos totais ou parciais das fibras de aço industriais comumente utilizadas no reforço dos pavimentos industriais de betão, contribuindo desta forma para a melhoria das suas propriedades em particular o seu comportamento pós-fissurado.

Estas composições alternativas mais sustentáveis têm ainda um grau de incerteza relativamente ao domínio da tecnologia e profundo conhecimento das propriedades mecânicas em virtude do seu desenvolvimento ser relativamente recente, fazendo com que a sua utilização na indústria da construção não seja ainda possível de uma forma tão disseminada. Por este motivo, são imprescindíveis uma caracterização e uma avaliação mais detalhadas ao nível da tecnologia do betão e das propriedades mecânicas deste compósito para que este tipo de material possa ser utilizado.

2.4.1. Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC)

O ASIC resulta da valorização de escórias de aciaria negra. As escórias são um material não metálico proveniente da produção do aço, as quais podem ser divididas em escórias de alto-forno e escórias de aciaria. As primeiras resultam da siderurgia integrada, onde o aço provém de minérios e o sistema de produção é o alto-forno, e as segundas advêm da siderurgia semi-integrada, em que aço advém da fusão de sucatas ferrosas num forno de arco elétrico e são comumente designadas por *Electric Arc Furnace Slag* (EAFS).

A siderurgia integrada produz escórias de alto-forno granuladas (caracterizam-se por conterem elevados teores de água e por serem de rápido arrefecimento), escórias de alto-forno expandidas ou peletizadas (arrefecimento rápido, mas com quantidades de água controladas) e as escórias de alto-forno arrefecidas ao ar (sujeitas às condições atmosféricas e arrefecimento lento). Por sua vez, a siderurgia semi-integrada gera escórias de aciaria que podem ser divididas em escórias de aciaria negra, designadas como um subproduto por possuírem valor comercial, e em escórias de aciaria branca designadas como um resíduo por não serem viáveis devido aos altos teores de cal nelas contidas. De entre os dois tipos de escórias de aciaria produzidas, só as escórias negras permitem obter o ASIC. Um terceiro tipo de escória, “escória de concha”, é possível de ser gerado quando impurezas adicionais são eliminadas do aço fundido durante o seu processo de fabrico.

Após serem separadas do aço líquido no final da etapa de oxidação, as escórias negras terão de sofrer um tratamento que compreende três fases para passarem a designar-se ASIC. Na primeira fase do tratamento de valorização dá-se o escoamento e arrefecimento da escória, na segunda fase é onde ocorre a separação da componente metálica, e por último na terceira fase ocorrem as ações necessárias à valorização da parte não metálica, nomeadamente separação por peneiração/calibração, refragmentação mecânica, eliminação das aparas metálicas que não tenham sido eliminadas na fase anterior e maturação por hidratação ao ar livre (Roque et al., 2006). A maturação é relevante para remover todo o óxido de cálcio e libertar óxido de magnésio (Ferreira et al., 2016). A remoção destas substâncias é imprescindível, uma vez que a sua presença conduz a expansões volumétricas do agregado, causando sérios danos às estruturas. De realçar que o processamento das escórias não gera quaisquer resíduos, não utiliza qualquer combustível ou produtos que sejam geradores de emissões.

As escórias negras, consoante a sua composição química, podem ser incorporadas no betão com diferentes funcionalidades. No caso de a escória conter uma elevada quantidade de cálcio e de ferro (EAFS-C) poderá ser uma alternativa aos agregados naturais. Caso a composição da escória contenha maioritariamente silício (EAFS-S), a utilização recomendada seria como aditivo no cimento. Para além destas aplicações, este material pode ser empregue na estabilização de solos, no tratamento de água, como material da sub-base e base de pavimentos, etc. (Nunes & Borges, 2021).

2.4.2. Caracterização do ASIC como agregado

O agregado é o principal responsável pelas resistências mecânicas num elemento estrutural de betão. Devido à sua importância, é determinante caracterizar o ASIC e avaliar a sua aplicabilidade como um agregado para betões de ligantes hidráulicos. Os parâmetros provenientes desta caracterização deverão ser posteriormente comparados com os requisitos e recomendações mínimas estabelecidas na especificação LNEC E 467 e na norma NP EN 12620:2013. Apesar destas especificações técnicas estarem associadas às propriedades da utilização de materiais naturais como agregados, os materiais alternativos, i.e., ASIC, deverão cumprir os mesmos requisitos, assim como para além dos previstos para resíduos da demolição e construção, visto que o conhecimento deste tipo de materiais ainda é muito reduzido.

Uma vez que a constituição química das escórias de aciaria varia consoante o tipo de sucata ferrosa utilizada, o EAFS terá composições químicas variáveis, sendo que as principais diferenças estão na

concentração de cálcio, silício e ferro. Desta forma, para além da habitual caracterização geométrica e mecânica, deve ser feita uma caracterização química ao ASIC segundo a norma NP EN 1744 – 1:2019.

Pacheco (2012) estudou o potencial deste resíduo como agregado de betão, tendo começado os seus estudos pela caracterização destes parâmetros. Este autor verificou que o ASIC é quimicamente estável, apresenta dureza e resistência bastante satisfatórias (coeficiente de Los Angeles – LA25), granulometria muito extensa e bem graduado, mas com uma fraca quantidade de partículas finas (< 4 mm). Para além disso, o autor concluiu que a resistência à fragmentação e esmagamento da escória de aciaria negra são excecionais, que devido à rugosidade e forma cúbica das partículas a interligação entre os grãos é boa e que a sua densidade média é cerca de 1,4 vezes superior à dos agregados naturais. Comparando os valores obtidos com os requisitos das diversas normas destinadas a parametrizar os agregados para betão, o autor concluiu que o ASIC pode ser incorporado como agregado no betão pois o índice de achatamento é inferior ao exigido ($F_{115} < F_{150}$ de acordo com LNEC E 467), bem como o coeficiente de Los Angeles ($LA_{25} < LA_{50}$ segundo LNEC E 467) e o valor da absorção de água (valores inferiores a 5%).

Ferreira (2010) também dedicou parte dos seus estudos a caracterizar o ASIC. Os resultados obtidos dos ensaios mecânicos correntes (LA e MDe) permitiram à autora classificar este material como um material com um desempenho mecânico intermédio. No entanto, com ensaios triaxiais cíclicos de longa duração foram obtidos módulos resilientes (relação entre a tensão de confinamento e a tensão desviadora) superiores aos dos materiais naturais, módulo de deformabilidade reversível característico de 720 MPa e deformação permanente axial igual a $6,98 \times 10^{-4}$, levando a autora a classificar o ASIC como material com desempenho mecânico excelente. Para além disso, a autora concluiu que o ASIC é pouco degradável e fragmentável visto que se trata de um material com boas resistências ao desgaste e à fragmentação. Os valores geométricos e físicos obtidos pela autora são muito semelhantes aos do estudo analisado anteriormente, ou seja, o ASIC apresenta uma granulometria extensa, tem uma massa volúmica elevada e um teor em água ótimo baixo e pode ser considerado como um material não plástico.

Apesar de a bibliografia existente não recomendar o uso de ensaios típicos de materiais naturais em materiais alternativos, a carência de ensaios adequados para estes materiais, obriga a que ainda se usem estes ensaios. Ainda assim, as propriedades obtidas por diversos autores permitem concluir que o ASIC tem as características essenciais para ser usado como agregado de betão.

Propriedades do betão com ASIC

Vários estudos têm sido desenvolvidos para estabelecerem o potencial e os benefícios da utilização de ASIC como substituto dos agregados naturais nas propriedades mecânicas e na durabilidade do betão.

As principais preocupações na utilização deste produto, como já referido anteriormente, é o risco de variação de volume causada pelo óxido de cálcio e o óxido de magnésio. Como tal, devem ser adotados processos de tratamento para assegurar que tal risco não ocorre.

Rehman et al. (2018) estudaram o efeito do ASIC como substituto do agregado fino nas percentagens de 40, 60 e 80%, em massa, no betão fresco e no betão endurecido. Relativamente às propriedades no estado fresco, os autores visualizaram uma tendência decrescente na trabalhabilidade com o aumento do teor de ASIC. Este decréscimo pode ser atribuído à textura rugosa e porosa deste tipo de material. Apesar disto, todas as propriedades mecânicas estudadas, nomeadamente resistência à compressão, flexão, tração e módulo de elasticidade foram melhoradas devido às reações pozolânicas dos agregados de ASIC e à sua maior dureza.

Nos trabalhos de Pacheco (2012), mencionados anteriormente, o autor separou o ASIC em frações de 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm e 16-32 mm, tendo adicionado igualmente areia fina para complementar a composição do betão desejado, já que a quantidade da fração 0-4 é reduzida. Posteriormente, o autor caracterizou o betão com ASIC no estado fresco e no estado endurecido. O Quadro 4 inclui a composição do betão estudado por este autor.

Quadro 4 – Composição do betão (Pacheco, 2012)

Materiais	Quantidade (kg/m³)
ASIC 16-32	720
ASIC 8-16	485
ASIC 4-8	240
ASIC 0-4	485
Areia	320
Cimento	310
Cinza Volante	140
Água	164
Adjuvantes	3,89

Com esta dosagem o autor obteve uma boa trabalhabilidade e consistência, sendo que a massa volúmica foi superior à de um betão corrente, como seria de esperar devido à maior densidade do agregado ASIC.

Relativamente às propriedades no estado endurecido, o autor obteve resistências à compressão bastante elevadas, tendo o betão sido classificado como C55/67. Comparando os valores das evoluções das resistências segundo as expressões do Eurocódigo 2 (EN 1992-1-1: 2004) e os que foram obtidos laboratorialmente, Pacheco (2012) concluiu que estas expressões traduzem com boa aproximação a evolução no tempo as resistências à tração por compressão diametral e à compressão uniaxial. No fim dos seus trabalhos, o autor pode concluir que a utilização do ASIC como substituto dos agregados naturais é viável.

Chen *et. al.* (2018), citados por Nunes & Borges (2021), avaliaram quatro gamas de granulometria de ASIC (< 0,063 mm; 0,063-0,5 mm; 0,5-2 mm; 2-4 mm) e a sua influência nas propriedades do betão. Os resultados obtidos mostraram que as partículas de ASIC com dimensões inferiores a 0,5 mm obtiveram melhores resistências compressivas do que as partículas com dimensões superiores. Ao executar misturas com diferentes taxas de substituição, os autores perceberam que a percentagem ótima de ASIC é de 20%.

De acordo com Nunes & Borges (2021), os resultados da literatura existente mostram mais uniformidade quando o ASIC é utilizado como agregado grosso. Saxena & Tembhurkar (2018) dedicaram os seus estudos a caracterizar um betão em que 50% da fração grossa dos agregados naturais foi substituída por ASIC. Estes autores, através do ensaio de abaixamento, verificaram uma redução na consistência do betão, bem como um aumento do teor de ar e da densidade fresca do betão. À semelhança de outros estudos semelhantes a este, em que foi analisada apenas a substituição da fração grossa dos agregados, estes autores obtiveram uma taxa ótima para a utilização agregados grossos de ASIC de 50%, em peso. Com estas taxas de substituição o módulo de elasticidade aumentou 22%, a resistência à flexão 9,8% e a resistência à compressão 33%. Para além destas propriedades, também a durabilidade do compósito aumentou, visto que a taxa de penetração de iões de cloreto diminuiu.

Rooholamini et al. (2019) após terem deixado as escórias ao ar livre durante um ano para reduzir a quantidade de óxido de cálcio e de óxido de magnésio e, conseqüentemente, reduzir a expansão do betão, avaliaram as propriedades mecânicas de um betão com agregados finos e grossos de ASIC. As taxas de substituição para agregados finos foram de 25 e 50%, em peso, e para os agregados grossos foram de 50 e 100%, em peso. A adição de agregados grossos de ASIC apresentou um efeito positivo

nas propriedades mecânicas do betão devido à elevada angularidade e rugosidade destas partículas. Por outro lado, a incorporação de agregados finos promoveu uma redução nas propriedades mecânicas e no comportamento de expansão. Os autores justificam a presença de óxido de cálcio livre para o aumento da expansão, sendo que a redução das propriedades mecânicas se deve à elevada superfície específica que os agregados finos apresentam. O aumento da superfície específica faz com que seja necessária uma maior quantidade de água, o que por sua vez reduz as resistências do betão.

Os estudos realizados por diversos autores permitem concluir que a substituição parcial e até mesmo total dos agregados naturais por agregados de ASIC é viável. É preciso, no entanto, um estudo mais aprofundado das possíveis variações associadas ao uso deste tipo de subproduto.

2.4.3. Definição e classificação dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

O Regime Geral de Gestão de Resíduos, no Decreto-Lei nº 10 2-D/2020, define RCD como sendo "*o resíduo proveniente de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição e da derrocada de edifícios*" (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019). Esta entidade especifica ainda que, quer os resíduos urbanos ou similares, quer a mistura de resíduos provenientes da obra com outros resíduos de origem distinta à mencionada anteriormente, não podem ser designados como RCD.

Os RCD, devido à diversidade de composições, origens, destinos finais e até mesmo de quantidades, não podem ser classificados num só parâmetro. Como tal e de acordo com Freire (2018), os RCD são classificados quanto ao tipo de obra, destino final e tipo de material. Com base nos materiais que constituem os RCD, a Lista Europeia de Resíduos, na Portaria nº 209/2004, divide os RCD em três grupos: inertes, não perigosos e perigosos.

A Agência Portuguesa do Ambiente elaborou uma lista onde indica quais os constituintes de RCD que podem ser valorizados e o seu correspondente código na lista europeia de resíduos (Quadro 5).

Quadro 5 – RDCs valorizáveis por grupos (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019)

Designação do grupo	Códigos da LER
Betão, tijolos e ladrilhos	170101; 170102; 170103
Madeira, plástico e vidro	170201; 170202; 170203
Misturas betuminosas e alcatrão	170303
Metais e cabos não contendo substâncias perigosas	170401; 170402; 170403; 170404; 170405; 170406; 170407; 170411
Balastros de linhas de caminho-de-ferro não contendo substâncias perigosas	170508
Materiais de isolamento não perigosos	170604
Gessos	170802
Misturas de RCD	170107; 170904

De modo a perceber a relação existente entre os constituintes, o tipo de obra de onde provêm e os materiais aí empregues, Brito (2012) analisou uma série de casos de estudos reais. Após a análise dos dados obtidos por este autor, é possível obter as seguintes conclusões:

- A maior parte do fluxo de RCD em construção nova é composto por agregados inertes (cerca de 83%), sendo, no entanto, algo mais expressiva a percentagem de contaminantes como materiais à base de gesso, madeira e metais (num total de 15%);
- Os RCD resultantes da reabilitação e demolição de edifícios de habitação são constituídos por mais de 90% de agregados inertes (pedra, betão e misturas de agregados cerâmicos), ou seja, materiais facilmente recicláveis e não tóxicos;
- A quantidade de agregados inertes continua a ser a mais preponderante em atividades de demolição, renovação e construção nova em edifícios de serviços, sendo, no entanto, pouco expressiva a quantidade de pedra não contaminada (agregados de betão e cerâmicos diversos);
- Em demolições/requalificações de estradas, a maior parte do fluxo de RCD é composto por misturas betuminosas (superior a 95%). No entanto, existem pequenas percentagens de madeira, metais e plásticos no fluxo global desta tipologia de resíduos.

Com isto, fica perceptível o potencial que os RCD têm já que a grande maioria dos resíduos gerados pela construção civil podem ser facilmente reconvertidos e reintroduzidos em novas aplicações e materiais, como é o caso das sub-bases, agregados de betão e até mesmo de ligantes.

2.4.4. Incorporação de agregados reciclados de RCD no betão

Nesta secção serão analisados os efeitos que a incorporação deste tipo resíduos origina no betão. De salientar que a qualidade do betão com incorporação de agregados reciclados provenientes de betão (BARB) depende essencialmente das características das impurezas aderidas ao agregado, nomeadamente, da quantidade de argamassa e pasta de cimento aderida, da proporção em que se substitui o agregado natural (AN), assim como de outros fatores. Deste modo, encontra-se uma importante variabilidade na qualidade dos agregados reciclados (AR), designadamente no que refere à qualidade de betões antigos que são mais suscetíveis de serem reciclados, pelo que a sua utilização deve ser cautelosa e deve seguir as recomendações presentes nas especificações técnicas, nomeadamente, na especificação E 471/2009 elaborada pelo LNEC (Miranda, 2014).

De forma geral, as propriedades mecânicas dos BARB são inferiores às dos betões convencionais. A redução da resistência à compressão é justificada, por Miranda (2014) e por Soares (2014), com o aumento da quantidade de água adicionada inicialmente para compensar a superior absorção de água dos AR, com a menor resistência mecânicas que os AR têm em comparativamente com os AN e com o aumento das zonas de interface frágeis que o betão reciclado apresenta. Também a resistência à tração diminuirá com esta substituição. De acordo com Gonçalves (2007), devido à maior rugosidade superficial que os AR possuem, o valor da resistência à tração não será tão afetado pela taxa de substituição de AN por AR como acontece com a resistência à compressão. No entanto, o aumento da razão a/c para colmatar a maior absorção de água por parte dos AR continuará a influenciar negativamente a resistência à tração. Um eventual aumento da resistência à tração pode indicar uma boa ligação entre os AR e a pasta de cimento ou um aumento do teor de cimento.

O módulo de elasticidade segue a mesma tendência, sendo que a diminuição se deve à maior porosidade que os AR possuem. Esta redução é tanto maior, quanto maior for a percentagem de substituição (Butler et al., 2013). A redução do módulo de elasticidade é uma das justificações encontradas por diversos autores para a redução da qualidade do betão em termos de fluência e retração. Para além disso, a maior dosagem de cimento normalmente utilizada para alcançar resistências semelhantes às dos betões convencionais e a maior quantidade de água utilizada para melhorar a trabalhabilidade dos BARB podem justificar o impacto negativo dos AR na fluência e a retração do betão.

Por fim, também a durabilidade destes betões pode diminuir, já que a impermeabilidade, a resistência aos ataques químicos e a resistência aos ciclos de gelo e degelo é menor, conforme observado por diversos autores (Gonçalves, 2007; Miranda, 2014; Soares, 2014).

2.4.5. Substituição parcial de cimento Portland por adições pozolânicas

Sendo a produção de cimento responsável pela emissão de níveis significativos de poluição de gases com efeito de estufa, representando 6-7% das emissões globais de CO₂ e cerca de 36% do consumo global de energia (Gaibor et al., 2021), betões que contenham cimentos com baixo teor de clínquer, principal responsável pelo fraco desempenho ambiental do ligante, ou que contenham substitutos parciais de cimento poderão ser opções ambientalmente mais sustentáveis.

Para que um material possa substituir parte da dosagem de cimento deve conter propriedades pozolânicas. As pozolanas são materiais constituídos por sílica e alumina (aluminossilicatos), que por si só não contêm nenhuma capacidade ligante, mas que à temperatura ambiente, com um certo grau de finura e na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com capacidade ligante (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). As pozolanas podem ter origem natural, artificial ou a partir de subprodutos industriais. As naturais são geralmente ricas em sílica, estão num estado amorfo ou criptocristalino e endurecem rapidamente, enquanto as artificiais surgem com uma instabilidade induzida na rede cristalina dos minerais argilosos verificando-se uma saída de iões de OH. Este tipo de pozolanas são geralmente argilas sujeitas a temperaturas suficientes para que a sua desidroxilação ocorra, mas inferiores ao início da sua recristalização. Nas pozolanas provenientes de subprodutos industriais sucede-se um processo semelhante ao das pozolanas artificial.

Atualmente, um dos substitutos mais utilizados são as cinzas volantes, um pó mineral fino gerado a partir da queima do carvão em centrais termoelétricas. Apesar do reaproveitamento das cinzas volantes permitir diminuir os impactos ambientais associados à deposição de resíduos da queima de carvão e minimizar o volume de escavações em pedreira, necessárias à produção do cimento, esta solução está com o final próximo em Portugal, pois com o encerramento das centrais termoelétricas a carvão, este subproduto deixará de existir com tanta abundância.

Desta forma, têm vindo a ser analisadas alternativas. Uma dessas alternativas são os resíduos cerâmicos, pois estima-se que existam em grande quantidade, possam ser facilmente moídos até ao tamanho desejado e são resistentes à degradação química, biológica e física (Alsaif, 2021). Os resíduos cerâmicos podem provir dos RCD, nomeadamente das telhas cerâmicas, paredes de alvenaria, louça sanitária, etc., e das diversas fases de produção da indústria cerâmica, onde cerca de 3-7% da produção total é desperdiçada (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). Para além dos resíduos cerâmicos, também a sílica de fumo, as cinzas de casca de arroz, as cinzas de lamas de estações de tratamento de água e as lamas de minas de tungsténio têm demonstrando elevado potencial para substituírem parcialmente o cimento.

Cumulativamente à presença de sílica e de alumínio na composição química do material, uma forma de aferir a potencialidade pozolânica de um material é através do índice de atividade. Este índice deve ter um valor superior a 85% para que a pozolana possa ser incorporada como substituto parcial do cimento. Resulta do quociente entre as resistências à compressão aos 28 dias de uma argamassa com 75% de cimento de referência e 25% de pozolana, em peso, e as resistências de uma argamassa preparada apenas com cimento de referência.

2.4.6. Resíduos cerâmicos como adição ao cimento Portland

Nesta secção pretende-se realizar uma análise ao impacto que a substituição parcial do cimento por pó de cerâmicos poderá originar nos betões.

Para determinar a potencialidade da utilização de resíduos cerâmicos como ligantes, Alsaif (2021) analisou a composição física e mineralógica destes resíduos tendo concluído que a distribuição granulométrica e a forma angular e irregular do pó de cerâmica são muito semelhantes à do cimento. Para além disso, Pacheco-Torgal & Jalali (2010) através de uma caracterização química aos resíduos cerâmicos, verificaram que os óxidos de sílica e de alumínio são os que existem em maior quantidade nas pastas cerâmicas e a sua proporção varia conforme o tipo de argila usada. Todas estas características levaram diversos autores a concluir que estes resíduos apresentam elevado potencial para serem uma alternativa ao cimento.

De forma a confirmar a viabilidade desta solução, Alsaif (2021) realizou uma pesquisa exaustiva dos trabalhos que foram desenvolvidos dentro desta temática. Este autor, após a sua investigação, concluiu que para baixas taxas de substituição, até 20%, as propriedades frescas, mecânicas e a durabilidade do betão não são significativamente alteradas. No entanto, foi notório que o aumento da dosagem de resíduos cerâmicos levou a que a trabalhabilidade da mistura reduzisse. Esta redução deve-se essencialmente à forma irregular e angular das partículas cerâmicas, ao aumento da superfície específica originada pela maior presença de finos e devido à superior absorção de água dos cerâmicos. De forma a mitigar este problema, a maioria dos autores analisados por Alsaif (2021), adicionaram superplastificantes às suas misturas, visto que este aditivo permite manter o teor de água baixo e evita que a matriz perca resistência.

Apesar disto, devido à potencialidade do pó de cerâmico comportar-se como filler e como ligante (em consequência de reações pozolânicas), diversos autores, nomeadamente, Bhargav & Kansal (2020) e

Agil & Kumar (2018), verificaram uma melhoria na resistência à compressão. Em ambos os estudos foram analisadas composições com taxas de substituição entre 0% e 20% tendo-se verificado uma tendência semelhante, ou seja, com a adição do pó cerâmico a resistência aumentou ligeiramente. No caso de Bhargav & Kansal (2020) com uma substituição de 20%, a resistência passou de 29,1 MPa para 30,4 MPa aos 28 dias, enquanto nos ensaios de Agil & Kumar (2018) aumentou de 33,6 para 35,2 MPa. Com 15% de substituição, a resistência à compressão obteve o melhor valor aos 28 dias em ambos os estudos. Comparando a evolução da resistência entre os betões convencionais e os que contêm resíduos cerâmicos, constata-se que o desenvolvimento da resistência nos betões alternativos é melhor em idades mais avançadas devido às reações pozolânicas.

Outro fator que potencia a resistência do betão é a temperatura de cura e o tipo de resíduo do qual o pó cerâmico provém. Pacheco-Torgal & Jalali (2010) verificaram que o pó cerâmico proveniente de tijolo conduz a melhores resistências comparativamente ao grés branco e às loiças sanitárias e que com temperaturas de cura mais elevadas a atividade pozolânica aumenta.

Contrariamente ao que se sucedeu nos trabalhos de Bhargav & Kansal (2020) e Agil & Kumar (2018), em que as resistências à compressão aumentaram com a incorporação de resíduos cerâmicos, nos estudos de Kannan et al. (2017) tal aumento não ocorreu. Neste caso, os autores desenvolveram um betão de referência e quatro misturas cujas dosagens de cimento foram substituídas parcialmente por resíduos cerâmicos. Desta forma, foi possível concluir que para taxas de substituição, em peso, de 10%, 20%, 30% e 40% a resistência à compressão diminuiu 15%, 17%, 18% e 20%, respetivamente, em comparação com o betão de referência.

A resistência à flexão segue a mesma tendência observada para resistência à compressão, ou seja, as misturas que obtiveram ganhos na resistência à compressão também viram a sua resistência à flexão aumentar, sendo que Bhargav & Kansal (2020) e Agil & Kumar (2018) determinaram novamente que 15% é a percentagem ótima de substituição.

Através do ensaio à tração por compressão diametral, Agil & Kumar (2018) não obtiveram resistências à tração uniformes, uma vez que com taxas de substituição de 10% e de 15% o betão obteve aumentos na resistência à tração, mas com a substituição parcial de 20% de cimento pelo pó cerâmico o betão perdeu 10% de resistência.

Para ser aplicado em pavimentos, o betão deve possuir uma reduzida retração e uma boa durabilidade. Alsaif (2021) verificou que a retração diminui proporcionalmente com o grau de substituição

de cimento por cerâmicos devido à finura e ao comportamento pozolânico do resíduo. Também a durabilidade aparenta ser melhorada com a incorporação de cerâmicos, já que a resistência à penetração de íões de cloreto e a resistência à corrosão por sulfatos são melhoradas, os betões têm valores elevados de resistividade elétrica e porque, após ataque de ácidos, a perda de massa destes betões é menor comparativamente com os betões tradicionais. Também Pacheco-Torgal & Jalali (2010) através de um conjunto de ensaios, nomeadamente absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao oxigénio, teste de difusão de cloretos e teste de envelhecimento acelerado, concluíram que a adição de cerâmicos como substitutos do cimento tem um impacto positivo na durabilidade dos betões.

2.4.7. Betão reforçado com fibras recicladas provenientes de pneus

Sendo a deposição de pneus em aterro proibida (diretiva 1999/31/CE), a utilização de fibras de aço que advêm de pneus usados no reforço do betão apresenta-se como uma solução sustentável de gestão de resíduos e como uma alternativa às armaduras convencionais e às fibras de aço industriais pois permite reduzir os custos associados à construção de pavimentos e providencia ao compósito maior capacidade de absorção de energia, maiores resistências, maior ductilidade e maior tenacidade comparativamente ao betão simples (Barros et al., 2005). Cumulativamente, a utilização de fibras de aço recicladas (FAR) provenientes de pneus usados tem um grande potencial, pois estima-se que mais de 1000 milhões de pneus atingem o fim da sua vida útil a cada ano que passa, sendo que este valor pode atingir os 5000 milhões até 2030 (Pacheco & Jalali, 2010).

Ao longo deste capítulo é feita uma revisão bibliográfica dos parâmetros que diversos autores utilizam para a caracterização das FAR, bem como as alterações que a incorporação destes resíduos provoca no betão. Por último, analisa-se a aplicabilidade desta solução nos pavimentos industriais com o auxílio das normativas e dos manuais técnicos existentes.

Caracterização das fibras de aço recicladas

Um pneu típico é composto por 75-90% de borracha, 5-15% de um cordão de aço de elevada resistência e por 5-20% de têxtil polimérico (Alsaif et al., 2018). Para separar os constituintes de um pneu podem ser adotados dois processos que se distinguem não só pelas técnicas adotadas, mas também pelos produtos obtidos. Os processos mecânicos reduzem os pneus em fibras de aço e em borracha granulada enquanto os processos térmicos decompõem o pneu em aço, carvão, líquidos e gases

(Pilakoutas et al., 2004). Assim, conforme o processo adotado, a qualidade e as propriedades das fibras obtidas irão variar. Nos processos mecânicos, se as fibras forem separadas da borracha numa fase inicial teremos uma fibra com dimensões longitudinais e transversais maiores do que as fibras que são retiradas numa fase mais avançada do processo. Para além disso, as fibras que são retiradas numa fase precoce caracterizam-se por ainda conterem grandes quantidades de borracha aderidas. No que se refere aos processos térmicos, as fibras apresentam maiores dimensões e menores quantidades de borracha, mas existe o risco de perderem alguma ductilidade devido às amplitudes térmicas impostas pelo processo de tratamento.

Conclui-se, portanto, que antes das fibras poderem ser utilizadas nos betões, é preciso quantificar os níveis de impurezas, solucionar os emaranhados de fibras e lidar com a heterogeneidade de resistências, de ductilidades e de características geométricas que as fibras recicladas apresentam. Consequentemente é comum realizar-se uma parametrização geométrica e mecânica das fibras a fim de compreender a sua influência no betão e adotar medidas que mitiguem a ocorrência de patologias no produto final.

Para além das diferenças geométricas, também a microestrutura das FAR é mais heterogénea, complexa e contém mais carbono do que as fibras de aço industriais (FAI), sendo que este aumento no teor de carbono eleva a concentração de austenita que se transformará em bainite se as FAR forem aquecidas a 350°C. Este microconstituente formado nos aços, apesar de aumentar a dureza da fibra, tem um efeito negativo na durabilidade do material (Frazão et al., 2019).

No âmbito da caracterização geométrica, diversos autores recomendam que se determine o diâmetro, o comprimento, o comprimento desenvolvido, o índice de curvatura e a esbelteza das fibras. Segundo Caggiano et al. (2017) e Simalti & Singh (2020), o diâmetro (D_F) deve ser obtido através da média aritmética entre o diâmetro das duas extremidades e o diâmetro no meio da fibra. Estas medidas, devido ao seu reduzido tamanho, devem ser obtidas por um micrómetro em dois sentidos em ângulo aproximadamente reto, com a exatidão de 0,01 mm sendo o diâmetro a média entre estes dois diâmetros. Este procedimento foi utilizado igualmente por Aiello et al. (2009), Köroğlu (2019) e Leone et al. (2018).

Para determinar o diâmetro equivalente de fibras de secção retangular ou irregular devem-se seguir as indicações presentes na norma NP EN 14889-1 (2007).

Para fibras retangulares o diâmetro equivalente calcula-se com:

$$d = \sqrt{\frac{4 l t}{\pi}} \quad (1)$$

Onde:

- l – Largura;
- t – Espessura;

Para fibras de secção irregular o diâmetro equivalente calcula-se com:

$$d = \sqrt{\frac{4 * m * 10^6}{\pi * L_D * \rho}} \quad (2)$$

Onde:

- m – Massa
- L_D – Comprimento desenvolvido
- ρ – massa volúmica do aço (aço macio = 7850 kg/m³; aço inoxidável = 7950 kg/m³)

O comprimento das fibras (L_F) deve ser expresso em milímetros e é definido, de acordo com a NP EN 14889-1 (2007), como a distância entre as extremidades externas da fibra. Já o comprimento desenvolvido da fibra (L_D), segundo a mesma norma, é o comprimento da fibra deformada depois de estirada sem deformação da secção transversal, ou seja, é o comprimento da fibra ao longo do seu eixo.

O índice de curvatura (C_L) e a esbelteza (λ) são duas propriedades que permitem relacionar estes parâmetros e obter informações adicionais sobre as características geométricas das fibras. O índice de curvatura é expresso em percentagem e pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$C_L = \frac{L_D - L_F}{L_D} \quad (3)$$

se C_L for igual a 0% significa que a FAR é completamente esticada, caso contrário, se C_L for 100%, a fibra está completamente dobrada.

A esbelteza provém do rácio entre o comprimento desenvolvido da fibra (L_D) e o seu diâmetro (D_F).

Uma vez que as fibras irão colmatar a deficiente resistência à tração que o betão simples apresenta, os autores aconselham quantificar a resistência à tração das fibras de aço. Para determinar esta

resistência, Aiello et al. (2009) sugerem a utilização de uma prensa eletromecânica e frisam a importância de garantir uma correta fixação entre a fibra e a máquina. A tensão pode ser determinada com recurso à seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{P_{max}}{\pi \left(\frac{D_f}{2}\right)^2} \quad (4)$$

onde P_{max} é a carga máxima registada pela célula de carga do equipamento de ensaio e D_f é o diâmetro médio da fibra.

Utilizando o ensaio de tração é igualmente possível retirar o valor do módulo de elasticidade. Neste caso, o ensaio deve ser feito sobre o material de base antes da deformação das fibras e o módulo de elasticidade calculado utilizando a tensão e a deformação a 10% e 30% da resistência à tração da fibra (NP EN 14889-1, 2007).

Para além da caracterização geométrica e da resistência à tração, diversos autores aconselham a caracterização do comportamento ao arrancamento, designado na literatura inglesa por *pull-out behaviour*. Ainda que este último não esteja somente dependente das propriedades das fibras, o seu estudo é muito interessante pois as propriedades do betão reforçado com fibras de aço (BRFA) dependem, para deslizamentos elevados, da ligação entre as fibras e a matriz (Abrishambaf et al., 2017; V. M. Cunha et al., 2010; Poveda et al., 2020; Tarifa et al., 2020). Esta análise micromecânica permite examinar a eficiência de diferentes comprimentos de fibras, tipos de ancoragens, aderência entre fibra e matriz e, conseqüentemente, seleccionar as fibras mais apropriadas para melhorar o comportamento pós-fissurado dos BRFA ao nível do material compósito.

Um outro parâmetro que diversos autores, nomeadamente Simalti & Singh (2020), analisaram nos seus estudos foi a densidade das fibras. Este parâmetro, revela-se de grande importância no caso deste tipo de fibras recicladas, podendo ser obtido pelo método do deslocamento da água. Através desta metodologia é possível determinar percentagem de impurezas que estão aderidas às fibras bem como, determinar posteriormente o volume de reforço efetivo realmente incorporado no betão.

Capacidade de absorção de energia

O aumento da capacidade de absorção de energia permite aumentar a capacidade de carga das estruturas e melhorar o seu comportamento à fendilhação. As fibras são um material que permite

aumentar a capacidade de carga das estruturas e melhorar o seu comportamento em fendilhação, pois têm a capacidade de manter as partículas fixas e, conseqüentemente, controlar a abertura de fendas. No entanto, para que tal aconteça é necessário garantir um mecanismo de arrancamento das fibras correto, isto é, evitando a rotura prematura da fibra, porque é através dele que a dissipação de energia ocorre. Estas propriedades inerentes às fibras tornam a sua utilização muito vantajosa em estruturas laminares e estruturas com elevado grau de hiperestaticidade, como por exemplo pavimentos industriais (Abrishambaf et al., 2015; Barros et al., 2005; Soltanzadeh et al., 2019) .

Köroğlu (2019) e Mastali et al. (2018) através dos resultados obtidos, comprovaram que a adição de FAR melhora a carga máxima e as propriedades pós-fissuração, visto que as fibras cingiram o desenvolvimento das fissuras antes e após de a resistência máxima da matriz ser atingida. Com a observação do modo de rotura dos provetes, Köroğlu (2019) concluiu que as misturas com 3% e 4% de FAR apresentaram melhores tenacidades e que a borracha aderida às fibras origina fracas ligações entre fibra-matriz, pelo que a resistência ao arrancamento sofre uma redução e surgem fissuras nestes locais.

Alsaif et al. (2018) concluíram que fibras com diâmetros menores e esbeltezas maiores, características normalmente associadas às FAR, controlam eficazmente as microfissuras e que as fibras com esbeltezas menores, característica associada às FAI, permitem um controlo mais eficaz das fissuras com maior dimensão. Por este motivo, as misturas híbridas (misturas com FAR e FAI) que Alsaif et al. (2018) desenvolveram evidenciaram maior capacidade de absorção de energia do que as misturas constituídas apenas com FAR.

O aumento da tenacidade com a incorporação de fibras comparativamente ao betão simples, ficou evidente nos trabalhos laboratoriais de Caggiano et al. (2017). No entanto, o comportamento pós-fissuração do betão com FAI e do betão com FAR não foi o esperado tendo em conta a bibliografia existente, já que o comportamento dos dois betões foi bastante similar. Desta forma, através da análise das propriedades dos materiais constituintes, percebeu-se que o índice de curvatura tem grande influência no comportamento pós fissuração. Quanto maior for este índice, maior aderência terão as fibras e capacidade de transferir tensões entre as faces das fendas e, conseqüentemente, mais eficientes serão. Esta influência da curvatura das fibras no comportamento do compósito já tinha sido observada por Neves et al. (2020) e Cunha et al. (2008) para betões reforçados com fibras industriais.

Contrariamente ao que acontece com a resistência à compressão, em que uma quantidade de fibras pode conduzir a uma redução na resistência, aqui, teores elevados de fibras produzem comportamentos pós fendilhação melhores, pois existirão mais elementos a contribuir para ligar as fendas.

Resistência à compressão

A incorporação de fibras de aço no betão não tem como objetivo principal alterar a resistência à compressão do compósito, no entanto os trabalhos laboratoriais realizados por diversos autores mostram que podem existir ligeiros aumentos (Cunha et al., 2008).

Köroğlu (2019), Mastali et al. (2018) e Simalti & Singh (2020) são alguns dos autores que se dedicaram a caracterizar mecanicamente os BRFA. De modo a diminuir a porosidade e a fraca trabalhabilidade que as fibras proporcionam ao betão, estes autores utilizaram um betão auto-compactável. Köroğlu (2019) produziu misturas com 1, 2, 3, 4 e 5% de FAR, enquanto Mastali et al. (2018) realizaram misturas híbridas com diferentes tipos de fibras (FAR, FAI e fibras de polipropileno) com a percentagem a variar entre 0,5%, 0,75%, 1% e 1,5%. A solução adotada por estes autores permitiu-lhes obter aumentos na resistência à compressão, sendo que as melhores resistências à compressão foram obtidas nas misturas que continham 1,5% de FAR e as que incorporavam 1% de FAI e 0,5% de FAR (aumentos de 50% comparativamente com o betão simples em ambos os compósitos). As misturas com fibras de polipropileno, apesar de terem tido sempre resistências à compressão superiores à do betão de referência, nunca tiveram aumentos significativos na resistência. Também nos trabalhos experimentais realizados por Köroğlu (2019), os diferentes teores de fibras elevaram ligeiramente a resistência à compressão do betão, com exceção da mistura com 1% de FAR que obteve um decréscimo insignificante (0,5%). Os maiores ganhos foram obtidos para uma taxa de incorporação de 4% que originou uma resistência à compressão 27% superior à do betão de referência.

Leone et al. (2018) elaboraram 3 misturas distintas (mistura de referência, mistura com FAR e mistura com FAI), com teores de fibras de apenas de 0,46%, em volume, de forma a manterem a trabalhabilidade do betão. Os valores obtidos pelos autores permitiram concluir que com uma quantidade tão reduzida de fibras as variações na resistência são praticamente insignificantes. Neste caso, o autor obteve reduções de 3% e 4% com a adição de FAR e de FAI, respetivamente, estando os valores dentro do erro experimental.

Para avaliar a influência que as impurezas, i.e., resíduos não metálicos, têm nas propriedades mecânicas do betão, Koroglu (2016) elaborou misturas com 2% e 3% de FAR provenientes de pneus de camião e cuja fração não metálica foi removida com recurso a processos mecânicos, bem como misturas com 1, 2,5 e 5% de fragmentos de pneus, ou seja, detritos com grande teor de borracha e fibras têxteis. Os resultados obtidos nos ensaios à compressão permitiram-lhe concluir que as misturas com fibras de aço obtiveram sempre resistências à compressão superiores à do betão de referência, tendo tido

aumentos de 10% com 2% de fibras e 7,5% com 3% de fibras. As misturas que continham grandes quantidades de resíduos de borracha obtiveram resultados opostos, ou seja, com o aumento da quantidade de resíduos a resistência à compressão diminuiu até 39%, comprovando-se que a presença de borracha tem um efeito negativo no betão, em virtude das suas reduzidas propriedades mecânicas.

Alsaif et al. (2018) analisaram o comportamento das FAR e das FAI quando adicionadas em simultâneo no betão tendo desenvolvido misturas que incorporavam FAR e FAI e misturas que continham somente FAR. Com a adição de 20 kg/m³ de FAI e de 20 kg/m³ de FAR, a resistência à compressão do betão aumentou 20% em comparação com o betão de referência. Com a adição exclusivamente de fibras recicladas (i.e., 40 kg/m³), estes autores obtiveram aumentos de 30%. O autor justifica a melhoria geral da resistência à compressão com a capacidade de as fibras controlarem as deformações desenvolvidas, devido ao efeito Poisson durante a carga axial, atrasando a formação de microfissuras e eventualmente a propagação instável que causa a falha por compressão. Já o aumento da resistência com as FAR é justificado pela geometria heterogénea das fibras e a sua melhor distribuição na mistura. Trabalhos semelhantes foram executados por Caggiano et al. (2017). Estes autores elaboraram conjunto de misturas com diferentes tipos de fibras, FAI e FAR, e diferentes quantidades. Os ensaios à compressão realizados permitiram-lhes concluir que a adição de fibras ao betão conduz a aumentos entre 5% e 10% na resistência à compressão.

Frazão et al. (2021) tentaram analisar a influência de adicionar elevadas quantidades de fibras na resistência à compressão do betão. Estes autores adicionaram 75,8 kg/m³ de FAR o que conduziu a uma redução de 3,7% na resistência, em comparação com o betão de referência. Esta redução na resistência deve-se ao elevado índice de vazios que a adição de fibras origina.

Através da bibliografia existente, pode-se concluir que quantidades crescentes de fibras podem aumentar a resistência à compressão do betão até um determinado limiar que depende principalmente dos agregados e da qualidade da matriz cimentícia. No entanto, uma maior quantidade de fibras de aço superior a esse valor limite, ou uma quantidade muito reduzida pode ter um efeito adverso na resistência à compressão resultante, gerando assim uma perda de resistência.

Resistência à tração

De modo similar ao observado para a resistência à compressão, as misturas reforçadas com FAR e as misturas reforçadas com FAI realizadas por Leone et al. (2018) apresentaram resistências à tração menores do que as do betão de referência, sendo que as variações da resistência à tração determinadas em ambas as séries foram ligeiramente maiores comparativamente com as reduções observadas nas respectivas resistências à compressão (reduções de 3% nas séries com FAR e 4% nas séries com FAI). Neste caso, a incorporação de FAR reduziu a resistência à tração em 10%, enquanto as misturas com FAI tiveram uma resistência à tração 11% menor comparativamente com o betão de referência.

Resultados contraditórios a estes foram obtidos por Koroglu (2016), que com adição de fibras de aço obteve sempre resistências à tração superiores à do betão de referência. Neste caso, a resistência máxima foi obtida na mistura que continha 2% de FAR, tendo a resistência aumentado 38%. Estes resultados estão em concordância com os valores obtidos por Samarakoon et al. (2019), que com teores de FAR de 0,5% e 1%, em volume, obteve resistências à tração 18% e 14% superiores às do betão de referência, respetivamente. Com a adição de FAI, o autor obteve aumentos bastante superiores, 31% e 36% para percentagens de 0,5% e 1%, em volume, respetivamente. Neste estudo, as FAR utilizadas tinham comprimento desenvolvido médio de 37 mm, diâmetro médio de 0,42 mm, esbeltez média de 100 e resistência à tração média igual a 870 MPa. O comprimento desenvolvido das FAI é muito semelhante aos das FAR (35 mm), mas o diâmetro é ligeiramente superior (0,55 mm) o que conduz a uma esbeltez menor (63,5). Relativamente à resistência à tração, estas fibras apresentam uma resistência média de 1250 MPa, fator esse que pode justificar parcialmente a diferença acentuada entre séries.

Resistência à flexão

Koroglu (2016) obteve aumentos na resistência à flexão, correspondente ao limite de proporcionalidade, com a adição de fibras ao betão, tendo sido observados aumentos até 26% com a incorporação de 2% de fibras. A partir deste teor de fibras, o autor verificou que a resistência à flexão diminuía ligeiramente porque o betão segregava.

De modo similar Alsaif et al. (2018) observaram aumentos no limite de proporcionalidade com a incorporação de fibras de aço no betão comparativamente com matrizes de betão simples de classe de resistência iguais. Neste caso, com uma mistura híbrida (20 kg/m³ de FAI e 20 kg/m³ de FAR) o autor obteve aumentos de 26%. Por sua vez na mistura que continha apenas FAR (40 kg/m³), a resistência à flexão aumentou 30% comparativamente com o betão de referência. Estes autores demonstraram ainda que quanto maior for a presença de resíduos não metálicos no betão, menor será a sua resistência. Isto deve-se às más condições de aderência entre as partículas de borracha e a pasta de cimento, bem como ao aumento do volume de vazios da mistura. Um dos fatores apontados pelo autor para a fraca aderência entre a borracha e a matriz é a maior facilidade que a borracha tem para se contrair quando submetida a um determinado nível de tensão, comparativamente ao betão.

Frazão et al. (2021) realizou um outro trabalho experimental com o intuito de avaliar a eficiência das FAR no comportamento à flexão, tendo estes autores adotado o ensaio de flexão de três pontos em vigas entalhadas (ver Figura 10).

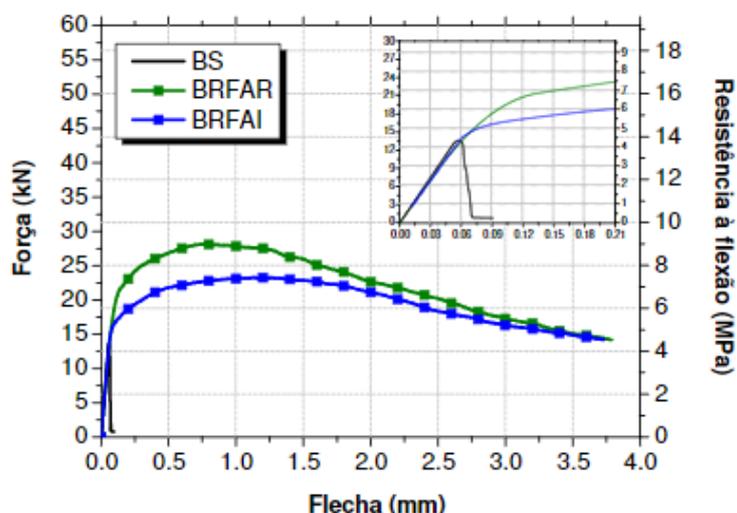


Figura 10 - Curvas Força - Flecha obtidas em vigas de BS, BRFAI e BRFAI (Frazão et al., 2021)

Os resultados obtidos confirmam a elevada eficiência que estas fibras têm no comportamento à flexão, visto que as resistências residuais alcançadas fornecem ao betão uma capacidade de deformação bastante superior à do betão de referência.

Fica assim evidente que, tal como esperado, a resistência à flexão do betão é melhorada significativamente com a incorporação de fibras, principalmente no seu comportamento pós-fissurado, quer pelo aumento substancial das resistências residuais, quer pelo aumento da capacidade de absorção de energia.

2.5. Especificações e normativas para pavimentos industriais e seus constituintes

Embora o desenvolvimento dos pavimentos industriais não tenha sido acompanhado por uma integração de documentos técnicos e normativos para os processos de dimensionamento e de construção, este capítulo pretende fazer um enquadramento das especificações existentes para os pavimentos industriais que inclui os requisitos para as propriedades do betão no estado fresco e endurecido, para a durabilidade, assim como para a utilização de fibras.

Atualmente existe uma normativa, EN 13877-1 e EN 13877-2, que especifica alguns requisitos para os materiais constituintes do betão dos pavimentos, assim como as propriedades do betão no estado fresco e endurecido. Na realidade esta norma refere-se a pavimentos rodoviários, porém como existem inúmeras semelhanças entre estes pavimentos e os pavimentos industriais, nomeadamente solicitações, substratos, hiperestaticidade e requisitos funcionais, na carência de normas apropriadas, este documento pode auxiliar o estudo destas estruturas. A presente normativa caracteriza-se por ser algo genérica, sendo que muitas vezes remete para outras normas referentes a materiais e ensaios de betão, que também foram alvo de análise, como é o caso da EN 206-1 – “Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade”, EN 10080 – “Aços para armaduras de betão armado”, EN 12350 – “Ensaio de betão fresco”, EN 12390 – “Ensaio de betão endurecido”, entre outras. Cumulativamente a estas normas, foram analisados outros documentos normativos e técnicos estrangeiros, como por exemplo a TR-34 e o ACI 544.1R-96, de forma a complementar este estudo e por na ausência de normativas europeias mais específicas, estes documentos serem usualmente seguidos com referência no dimensionamento e construção de pavimentos industriais.

2.5.1. Especificações para os agregados

Sendo os agregados um dos constituintes do betão, é importante especificar algumas das características, nomeadamente as suas dimensões nominais, de modo a obter uma granulometria capaz de conferir ao BRF as características desejáveis no estado fresco e no estado endurecido. Desta forma, a norma BS EN 13877-1 (2013) exige que a dimensão nominal máxima do agregado seja menor de que um terço da espessura da laje e que na escolha da dimensão máxima do agregado deve ser também tido em consideração a espessura do recobrimento e o espaçamento entre armaduras, caso existam. Para além destes motivos, a TR-34 (2018) refere que o tamanho máximo nominal do agregado grosso deve ser 20 mm de modo a minimizar o consumo de água e, conseqüentemente, diminuir o efeito de retração. Relativamente aos agregados finos, o mesmo documento técnico refere que a percentagem de agregados passados no peneiro 63 µm não deve exceder os 9% e que dependendo do volume e tipo de fibra utilizada, pode ser necessário aumentar o teor de agregados finos para melhorar a dispersão de fibras e tornar o betão mais fácil de compactar. Este manual recomenda ainda um coeficiente máximo de 40 para o agregado no ensaio de Los Angeles.

O ACI 544.1R-96 (2009) apresenta um quadro (ver Quadro 6) com a granulometria recomendada para os BRFA de forma a minimizar a aglomeração de fibras e a maximizar a trabalhabilidade.

Quadro 6 - Granulometria recomendada para BRFA [adaptado de ACI 544.1R-96 (2009)]

Percentagem de passados para o tamanho máximo de:					
Peneiro (E.U.A Standard)	3/8 in. (10 mm)	1/2 in. (13 mm)	3/4 in. (19 mm)	1 in. (25 mm)	1 1/2 in. (38 mm)
2 (51 mm)	100	100	100	100	100
1 1/2 (38 mm)	100	100	100	100	85-100
1 (25 mm)	100	100	100	94-100	65-85
3/4 (19 mm)	100	100	94-100	76-82	58-77
1/2 (13 mm)	100	93-100	70-88	65-76	50-68
3/8 (10 mm)	96-100	85-96	61-73	56-66	46-58
#4 (5 mm)	72-84	58-78	48-56	45-53	38-50
#8 (2,4 mm)	46-57	41-53	40-47	36-44	29-43
#16 (1,1 mm)	34-44	32-42	32-40	29-38	21-34
#30 (600 µm)	22-33	19-30	20-32	19-28	13-27
#50 (300 µm)	10-18	8-15	10-20	8-20	7-19
#100 (150 µm)	2-7	1-5	3-9	2-8	2-8
#200 (75 µm)	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2

A retração é também influenciada pelo tipo de agregados utilizados. Agregados que estejam frequentemente associados a baixa retração, como por exemplo o quartzo, devem ser preferencialmente utilizados em vez do uso de arenito e alguns agregados provenientes de rochas ígneas que estão mais suscetíveis de causar retração. A norma BS 8500-2 limita o valor da retração provocada pelos agregados em 0,075% quando testados de acordo com a norma EN 1367-4.

2.5.2. Especificações para as fibras

Os principais requisitos das fibras para utilização em betões detêm-se com as suas dimensões, resistência à tração e módulo de elasticidade. No caso de fibras poliméricas, também o ponto de fusão e ignição e a suscetibilidade de libertação de substâncias perigosas deve ser tida em consideração.

O documento técnico ACI 544.2R-17 (2017) menciona que a esbelteza das fibras de aço deve estar compreendida entre 20 e 100 e que o seu comprimento pode variar entre 6,4 mm até 76 mm. Este manual técnico refere ainda que a norma ASTM A 820 e a Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis exigem que a resistência mínima à tração das fibras de aço seja 345 e 552 MPa, respetivamente.

Passos (2011) defende que o comprimento crítico das fibras (comprimento mínimo que a fibra deve ter para que a força máxima da fibra seja mobilizada) está dependente do diâmetro da fibra e da ligação fibra-matriz e que o comprimento máximo não deve ser superior ao dobro da dimensão máxima do agregado.

Relativamente ao teor de fibras, a norma NP EN 14845-2 (2007) refere que o seu valor deve ser determinado de modo a obter uma resistência residual média à flexão de, pelo menos, 1,5 MPa a 0,5 mm CMOD (equivalente a uma flecha central de 0,47mm) e uma resistência residual média à flexão de, pelo menos, 1 MPa a 3,5 mm CDMO (equivalente a uma flecha central de 3,02mm). O ACI 544.1R-96 (2009) refere que a dosagem típica das fibras de aço é entre 0,25 a 1,5% do volume da mistura. A Figura 11 apresenta a variação da abertura de fissura média com a percentagem volumétrica de fibras.

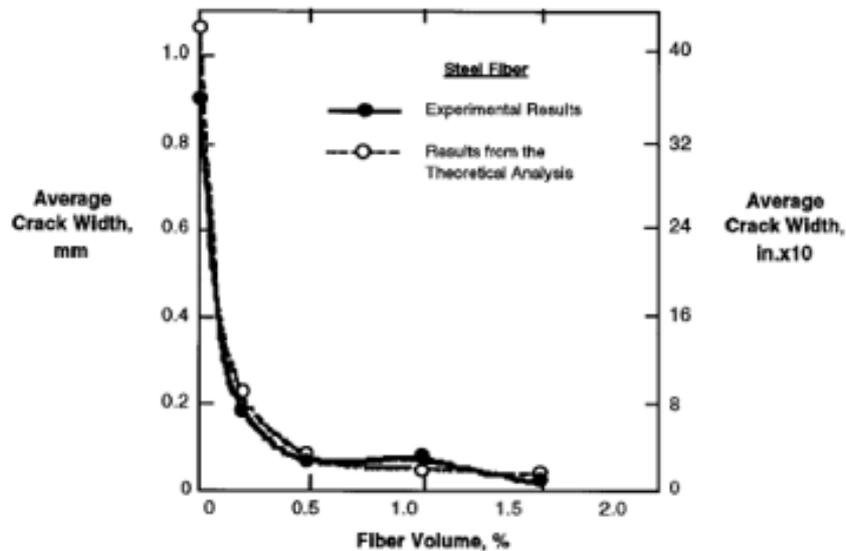


Figura 11 - Relação entre teor de fibras e largura da fenda (ACI 544.1R-96, 2009)

As fibras poliméricas, de acordo com a norma NP EN 14889-2 (2007), devem ser classificadas segundo a sua forma física em:

- Classe Ia: Microfibras: diâmetro < 0,30 mm; monofilamentares;
- Classe Ib: Microfibras: diâmetro < 0,30 mm; fibrosas;
- Classe II: Macro fibras: diâmetro > 0,30 mm.

Devem se realizar ensaios para as seguintes propriedades: dimensões e tolerâncias, forma, propriedades relacionadas com a tração, modulo de elasticidade (só para a Classe II), ponto de fusão e ponto de ignição, efeito das fibras sobre a consistência e efeito das fibras sobre a resistência do betão (só para a Classe II).

2.5.3. Especificações para o betão no estado fresco

As propriedades dos BRF no estado fresco são influenciadas pela esbelteza, pela geometria e taxa de incorporação das fibras, assim como pelas propriedades reológicas da matriz. Uma dessas propriedades é a consistência do betão fresco. Esta propriedade representa a facilidade com que o betão pode ser transportado, colocado, compactado e acabado sem que ocorra segregação (ACI 544.2R-17, 2017). Pode ser especificada por classe de consistência ou por valor-alvo em conformidade com a norma EN 206-1 e deve ser adequada para ser utilizada na construção de um pavimento (BS EN 13877-1, 2013; TR-34, 2018).

Para determinar a classe de consistência do betão, existem diversos ensaios capazes de o fazer, nomeadamente o ensaio de abaixamento, ensaio Vêbe, ensaio de compactação, ensaio de espalhamento e ensaio do cone invertido com medição do tempo de fluxo. De acordo com a norma ACI 544.2R-17 (2017), o ensaio de abaixamento pode não ser um bom indicador da trabalhabilidade de BRF, no entanto, uma vez determinada a mistura ótima, este ensaio pode ser usado como um teste de controlo de qualidade. O ensaio Vêbe apesar de não ser tão fácil de utilizar devido ao tamanho e peso do equipamento, é o ensaio recomendado por esta norma. A TR-34 (2018), apresenta uma recomendação contrária à do ACI 544.2R-17, visto que sugere a utilização do ensaio do cone de Abrams descrito na norma EN 12350-2 para medir a consistência. Neste caso, a escolha da amostra deve seguir as recomendações da EN 12350-1. Este manual técnico permite que a trabalhabilidade seja medida por classes, de acordo com a norma EN 206, ou por valor-alvo. No caso de se adotar a classificação por classes, os betões devem possuir uma trabalhabilidade superior à classe S2. Caso contrário, deve-se fixar um valor-alvo de 100 mm ou 140 mm para medir a trabalhabilidade do betão simples. No caso de o betão conter fibras, as gamas de abaixamento aceitáveis para cada valor-alvo são as que se encontram entre parênteses no quadro seguinte.

O Quadro 7 apresenta o intervalo de valores de abaixamento que as amostras podem possuir consoante a classificação que lhes foi atribuída.

Quadro 7 - *Slump* recomendado pela (TR-34, 2018)

Classe e valor-alvo de abaixamento	Gama admissível (mm)	
	Amostra pontual	Amostra composta
S2	30-110	40-100
S3	80-170	90-160
Valor-alvo 100	50-150 (60-140)	60-140 (70-130)
Valor-alvo 140	90-190 (100-180)	100-180 (110-170)

A amostra deve ser ou pontual, no caso de ser retirada no início da betonagem, ou composta se for constituída por subamostras retiradas ao longo da betonagem.

A NP EN 14889-1 (2007) refere que a consistência deve ser determinada de acordo com a EN 12350-3 para um betão de referência sem fibras e, posteriormente, para o betão de referência com fibras. Desta forma, a consistência do betão de referência, sem fibras, deve atingir a classe Vêbe V3 (10 s – 6 s) conforme preconizado na EN 206-1.

A adição de fibras terá sempre efeitos negativos na trabalhabilidade, visto que a consistência do betão ir-se-á modificar. Passos (2011) justifica estes impactos com o facto das fibras, no âmbito da trabalhabilidade, serem consideradas como agregados e caracterizarem-se por possuírem um coeficiente volumétrico (razão entre o volume do agregado e o volume de uma esfera com diâmetro igual à maior dimensão do agregado) sempre inferior a 0,12, limite que define se a trabalhabilidade é boa (para valores superiores a 0,12) ou não. Para solucionar este problema é necessária uma maior quantidade de água que será diretamente proporcional com o comprimento das fibras e com a redução do seu diâmetro ou adicionando um plastificante / superplastificante à mistura.

2.5.4. Betão endurecido

A norma NP EN 14845-1 (2007) recomenda que a aptidão das fibras seja determinada através da comparação entre um betão de referência sem fibras e um BRF. Assim, a presente norma especifica a composição e as características que os betões de referência devem possuir e recomenda que a razão agregado/cimento seja mantida.

A seleção do betão de referência é feita tendo em conta o tipo de produto ou sistema onde as fibras vão ser aplicadas. As proporções do betão de referência devem ser ajustadas dentro dos limites abaixo indicados de forma a alcançar uma resistência média à tração por flexão dentro da banda definida no Quadro 8.

Quadro 8 - Razão a/c e limites da dosagem de cimento (NP EN 14845-1, 2007)

Resistência à tração por flexão (MPa)	Razão a/c		Dosagem máx. de cimento (kg/m ³)
	Máx. dimensão do agregado		
	8 mm ou 10 mm	16 mm ou 20 mm	
4,3 +/- 0,3 (C25/30) ***	0,55 **	0,55 *	350
5,8 +/- 0,4 (C40/50) ***	0,45**	0,45**	400

* composição obrigatória / ** composição opcional / *** classe de resistência à compressão da EN 1992-1-1

A resistência à compressão e a resistência à tração devem ser selecionadas e especificadas sempre que necessário em conformidade com a norma EN 206-1 e segundo a norma BS EN 13877-2 (2013) devem tomar o valor mínimo de 20 MPa e 1,7 MPa, respetivamente.

A TR-34 (2018) limita a relação a/c em 0,55 de forma a reduzir a retração do betão e consequentemente o aparecimento de fissuras. Aconselha a utilização de aditivos redutores de água visto

que quanto maior for o volume de água maiores serão os efeitos da retração. Estes aditivos são normalmente doseados a 0,3 a 0,7 litros por 100 kg de cimento e dão reduções de água até 30% sem reduzir a consistência do betão.

Para pavimentos é aconselhado que, em circunstâncias normais, a percentagem de cinzas volantes e de escória alto forno seja inferior a 30 e 35%, respetivamente. O Quadro 9 resume as propriedades relevantes dos cimentos e combinações normalmente utilizadas em pavimentos (TR-34, 2018).

Quadro 9 - Propriedades e dosagens de cimento

Propriedades do betão	Cimento (de acordo com a Tabela A.6 BS 8500-1)			
	CEM I	I/A-LL	I/A-L e I/B-V	I/A, I/B-S e I/IIA
Gama de adição	-	6-20% cal	6-35% cinzas volantes	6-65% escória de alto forno
Resistência dos 7 aos 28 dias	Apróx. 80%	Apróx. 80%	Apróx. 50-80%	Apróx. 60-80%
Consistência	-	Similar	Reduzida utilização de água	Similar
Coesividade	-	Segregação reduzida	Taxa de segregação reduzida, maior tempo de segregação	Pode segregar mais do que o CEM I
Tempo de cura	-	Similar	Aumenta	Ligeiramente mais demorado. Pode aumentar substancialmente em baixas temperaturas
Calor de hidratação	-	Similar	Reduzido para adições elevadas	
Requisitos para a cura	Todos os cimentos devem ter uma cura adequada para desenvolver a resistência à abrasão			

2.5.5. Durabilidade

A durabilidade dos pavimentos é garantida pelos limites impostos a determinadas características do betão. Estes limites dependem do ambiente a que a estrutura vai estar sujeita. A norma NP EN 206-1 remete este assunto para a especificação LNEC E464. Esta característica é definida pelos seguintes parâmetros:

- Classe de exposição ambiental – Esta classificação tem em consideração o ataque sobre o betão (gelo-degelo ou ataque químico) e o ataque sobre as armaduras ou metais embebidos (corrosão induzida por carbonação ou por iões cloreto);
- Classe de teor de cloretos.

As fontes mais significativas e comuns de cloretos são ambientes marinhos e sais de degelo aplicados nas superfícies. Os cloretos têm pouco efeito sobre o betão endurecido, mas aumentam o risco de corrosão das armaduras pelo que o teor total de iões de cloreto não deve exceder 0,40% da massa de cimento quando o betão contém aço não protegido contra a corrosão.

Os sulfatos são potencialmente nocivos para o betão e estão presentes em materiais alcalinos como por exemplo os solos, as rochas e as águas subterrâneas. Uma vez que todos estes materiais estão muitas vezes em contacto com os pavimentos industriais, a sua quantificação deve ser alvo de especial atenção.

O Quadro 10, presente na TR-34 (2018), indica a taxa de ataque de vários ácidos comuns. Os ácidos podem tornar-se mais concentrados devido à evaporação, levando a uma maior taxa de ataque. É importante perceber que muitos ácidos são produtos de reações de outras substâncias que podem, em si mesmas, ser inofensivas para o betão ou podem estar presentes apenas em baixas concentrações nestas substâncias.

Quadro 10 - Taxa de ataque no betão por ácidos (TR-34, 2018)

Efeito no betão	Ácidos inorgânicos (minerais)	Ácidos orgânicos
Rápido	Clorídrico, Nítrico, Sulfúrico	-
Lento	Carbónico, Fosfórico	Acético, Fórmico, Húmico, Láctico, Tânico
Negligenciável	-	Oxálico, Tartárico

Para além destes fatores, a resistência à abrasão pode também ser um indicador da durabilidade do betão, especialmente em pavimentos. Assim, a normativa indiana IS 9284 (2002) define as seguintes diretrizes para diferentes categorias de superfícies de betão com base na perda por abrasão do betão conforme indicado no Quadro 11.

Quadro 11 - Valores máximos na perda por abrasão (IS 9284, 2002)

Número	Categoria	Valor máximo na perda por abrasão, % por massa
1.	Pavimento de betão:	-
1.a.	Com tráfego misto (rolamentos rígidos e pneumáticos)	0,16
1.b.	Apenas com tráfego com rolamentos pneumático	0,24
2.	Piso de fábrica	0,16

3. Formulação de betão com agregados reciclados

3.1. Introdução

A produção de betão com recurso a agregados naturais provoca um consumo excessivo de recursos naturais e de energia. Adicionalmente, nos últimos anos tem-se assistido a um aumento da quantidade de resíduos provenientes das mais diversas indústrias que, no caso de não serem devidamente geridos, a sua deposição em aterro afetará negativamente o ambiente e a biodiversidade existente nestas zonas. Assim, novos métodos de produção de betão e de gestão de resíduos têm vindo a ser revistos com o intuito de reduzir o impacto ambiental associado a estes dois fatores, salvaguardando sempre os aspetos funcionais e económicos. Uma forma de solucionar os dois problemas em simultâneo passa por produzir betão com resíduos e materiais reciclados como alternativa aos materiais naturais comumente utilizados como agregados ou ligantes. A análise da bibliografia existente demonstrou que os betões reciclados sofrem algumas perdas nas características quando comparados com os betões convencionais. Para além disto, a incerteza e a segurança quanto à sua durabilidade e funcionalidade a longo prazo inibem ainda a sua utilização na indústria da construção.

De forma contribuir nesta inevitável transição, parte deste trabalho foi dedicado à conceção de misturas de betão com agregado siderúrgico inerte para a construção (ASIC), como agregado e ligante, e pó cerâmico proveniente de RCD como filler e substituto parcial da dosagem de cimento. Com isto, o objetivo do presente capítulo foi analisar as características quer dos agregados de ASIC e do pó de cerâmica quer do betão com eles confeccionado, seguindo as normas e diretrizes recomendadas. A caracterização dos betões foi realizada no estado fresco e no estado endurecido com recurso aos seguintes conjuntos de ensaios: i) ensaio de abaixamento, ii) ensaios à compressão em provetes cilíndricos, iii) avaliação do módulo de elasticidade e iv) ensaios à tração por compressão diametral (ensaio brasileiro).

Este trabalho experimental foi realizado com base no conhecimento adquirido nos trabalhos Gaibor et al. (2021) e Neves et al. (2020), no âmbito dos projetos CirMat e ReNew. Desta forma, foi aqui aproveitado todo o conhecimento desenvolvido e utilizado pelos referidos autores para desenvolver uma campanha experimental de fabrico e caracterização de quatro composições de betão, que serviram de

base para a seleção da composição de base para o desenvolvimento de um betão reforçado com fibras de aço recicladas (Capítulo 4).

3.2. Método modificado de Andreasen & Andersen (A&A)

O desenho da composição das diversas misturas de betão foi elaborado com base no Método das expressões modificadas de Andreasen & Andersen, A&A, e no algoritmo de otimização desenvolvido por Pereira (2016). Antes deste método, diversos autores dedicaram os seus estudos ao desenvolvimento de métodos para determinar as composições de betão ótimas de forma a obterem misturas com resistências maiores e características uniformes. Alguns desses autores foram Féret no fim do Séc. XIX, Fuller e Thompson no início do Séc. XX e Andreasen & Andersen na década de 30. O método de cálculo desenvolvido por A&A para determinar as composições de betão exibiu algumas limitações, das quais se destaca a não consideração do contributo das propriedades granulométrica dos finos no esqueleto da matriz. Visto que um betão necessita que a porosidade da estrutura granular seja mínima para obter resistências máximas, o método inicialmente desenvolvido por estes autores foi alvo de algumas retificações passando a designar-se "Método das expressões modificadas de A&A".

Com esta modificação a classificação granulométrica de todos os agregados passou a ser considerada no estudo da matriz, já que tanto o diâmetro máximo da partícula, D_{max} , como o diâmetro mínimo, D_{min} , são considerados no estudo do desenvolvimento da matriz de betão, como é apresentado na equação seguinte:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (5)$$

sendo que D representa o tamanho da abertura do peneiro utilizado na análise granulométrica do agregado, $P(D)$ representa a fração total de partículas menores que o tamanho D , e q representa o módulo de distribuição.

A seleção do módulo de distribuição é preponderante para obter um betão com a consistência desejável e para determinar a proporção entre as partículas finas e grossas na mistura. Segundo Husken (2010) q pode variar entre 0,1 para betões fluidos e 0,9 para betões densos. De acordo com Neves et al. (2020) q deve possuir o valor de 0,23 para betões de alta resistência reforçados com fibras de aço.

Como o agregado de ASIC tem elevada porosidade e elevada densidade, neste estudo, o valor de q foi de 0,15 de modo a obter um betão com boa trabalhabilidade quer sem fibras, quer com a adição de fibras de aço.

Após determinar o módulo de distribuição é necessário otimizar a composição da mistura atendendo aos materiais que compõem o esqueleto sólido da matriz de betão. Utilizando o algoritmo de otimização fundamentado no método dos mínimos quadrados, são ajustadas as proporções de cada ingrediente até que se verifique um ajuste ótimo, i.e., até que se verifique o menor desvio, entre a curva da mistura e a curva de referência do método.

O desvio (*residual sum of squares, RSS*) entre a curva da mistura e a curva de referência, é expresso pela soma dos quadrados das várias partículas que compõem o esqueleto sólido, pode ser obtido por:

$$RSS = \sum_{i=1}^n [P_{mix}(D_i^{i+1}) - P_{tar}(D_i^{i+1})]^2 \quad (6)$$

em que $P_{mix}(D_i^{i+1}) - P_{tar}(D_i^{i+1})$ representa a influência do agregado com diâmetro entre i e $i+1$ na curva da mistura e na curva de referência, respetivamente (Freitas, 2017).

3.3. Materiais e composições

3.3.1. Descrição dos materiais

Agregados naturais: brita e areia

Para desenvolver a mistura de referência foram utilizados quatro tipos de agregados naturais de natureza granítica, brita com granulometria entre 6-14 mm, brita 14-20 mm, areia grossa (0-4 mm) e areia fina (0-2 mm) (ver Figura 12). Os agregados foram cedidos e caracterizados pela *dstLaboratório*. O referido laboratório realizou a análise granulométrica dos agregados, seguindo as recomendações da norma NP EN 933-1, e determinou a massa volúmica e a absorção de água dos agregados através da norma NP EN 1097-6 (ver Quadro 12). As curvas granulométricas dos agregados constam na Figura 13.



a) Brita 6-14 mm

b) Brita 14-20 mm

c) Areia fina 0-2 mm

d) Areia grossa 0-4 mm

Figura 12 - Agregados naturais

A escolha destes agregados foi feita de forma a promover uma distribuição uniforme da dimensão dos agregados da curva de mistura, conferindo à mistura uma maior compactidade.

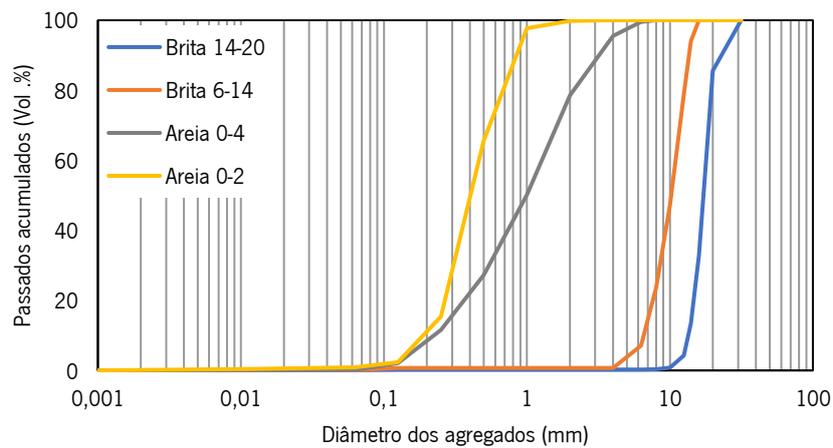


Figura 13 - Curvas granulométricas dos agregados naturais

Quadro 12 - Propriedades dos agregados

	Materiais			
	Brita 6-14 mm	Brita 14-20 mm	Areia 0-2 mm	Areia 0-4 mm
Massa volúmica (Mg/m ³)	2,64	2,64	2,62	2,61
Quantidade de pó retido no #125 μ m	0,72%	0,25%	2,38%	2,05%

ASIC

No estudo das diferentes composições foi utilizado agregado siderúrgico inerte para a construção, ASIC, como substituto dos agregados naturais, do cimento e das cinzas volantes. Este material proveio da siderurgia nacional da Maia e foi fornecido e devidamente separado pela *dstLaboratório* em granulometrias diferentes: 0-1 mm, 0-4 mm e 0-20 mm (Figura 14). A análise granulométrica, a determinação da massa volúmica e da absorção de água destes agregados seguiu as recomendações da norma NP EN 933-1 e da norma NP EN 1097-6, respetivamente. As curvas granulométricas dos ASIC são representadas na Figura 15 e a massa volúmica e absorção de água na Quadro 13.

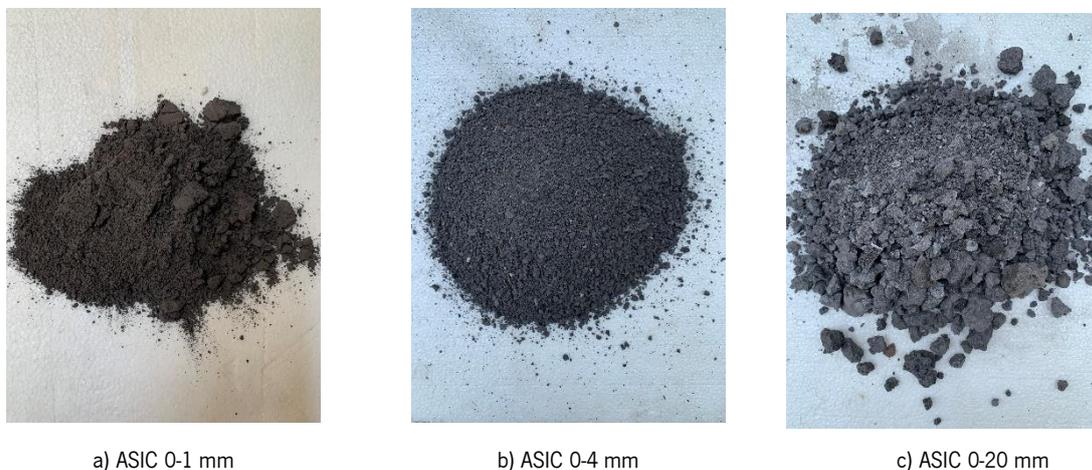


Figura 14 - ASIC com diferentes granulometrias

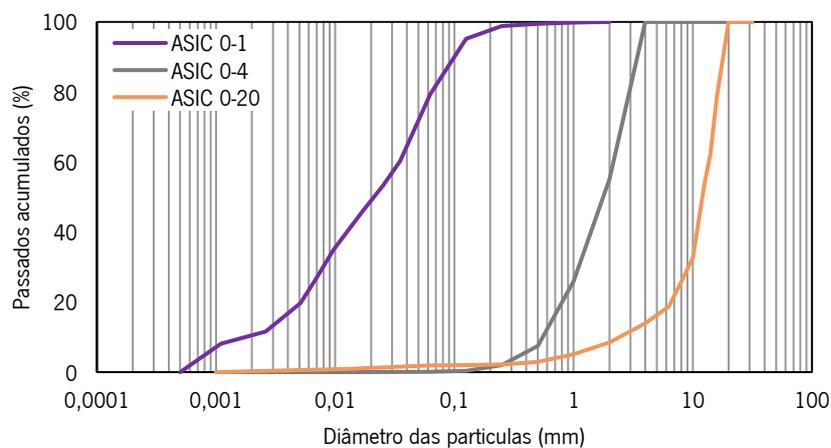


Figura 15 - Curvas granulométricas ASIC

Quadro 13 - Propriedades do ASIC

	Materiais		
	ASIC 0-1 mm	ASIC 0-4 mm	ASIC 0-20 mm
Massa volúmica (Mg/m ³)	3,6	3,49	3,25
Quantidade de pó retido no #125/ μ m	100%	0,36%	1,99%
Absorção de água	-	0,7%	1,55%

Pó de cerâmico

Com o intuito de substituir parcialmente a dosagem de cimento, ou como substituto das cinzas volantes, pó de cerâmico foi adicionado à mistura. Os resíduos que deram origem ao pó foram fornecidos pela empresa Cerâmica Amara de Macedo, Lda.

Através da caracterização geométrica e química realizada por Gaibor et al. (2021), pode-se constatar que 80% dos resíduos cerâmicos apresentam um diâmetro entre 2 e 18 μ m antes de serem moídos (Figura 16 a.) e que são ricos tanto em dióxido de silício (54,9%) como em trióxido de alumínio (26,3%). O Quadro 14 inclui a composição química do resíduo cerâmico utilizado no presente trabalho.

Quadro 14 - Composição química dos resíduos cerâmicos (Gaibor et al., 2021)

Material	Na₂O	MgO	Al₂O₃	SiO₂	P₂O₅	SO₃	Cl₂O	K₂O	CaO	TiO₂	Cr₂O₃	MnO	Fe₂O₃
Resíduo Cerâmico (%)	0,13	1,30	26,28	54,89	0,42	0,59	0,12	3,97	0,64	1,40	0,30	0,86	9,10

Devido à elevada quantidade de sílica e de alumínio pode-se concluir que este resíduo tem elevado potencial para ser incorporado como substituto do cimento já que estes elementos originam reações pozolânicas. Para além da eventual capacidade de ligante, o resíduo cerâmico será utilizado como filler, substituindo as cinzas volantes que, até ao encerramento das centrais termoelétricas a carvão, eram usadas nos betões.



a) Resíduo cerâmico



b) Pó cerâmico

Figura 16 - Cerâmico antes e após moagem

Para que de facto o resíduo cerâmico tenha estas funcionalidades é necessário que as partículas tenham uma dimensão mais reduzida para que a geopolimerização ocorra. Como tal, os resíduos cerâmicos foram fragmentados através de um moinho com 18 bolas de aço de 0,42 kg cada uma durante 4 horas e 20 minutos. Cada ciclo de moagem foi realizado com 13 kg de resíduos cerâmicos. Para controlar a qualidade da moagem determinou-se a percentagem de acumulados das partículas com recurso a peneiração mecânica. Deste modo, o ciclo de moagem só terminava quando pelo menos 55% das partículas tinham dimensões inferiores a 63 μm .

Após os registos da percentagem de acumulados em cada peneiro, foi traçada a curva granulométrica do pó de cerâmica (Figura 17). De acordo com Gaibor et al. (2021) a massa volúmica do pó de cerâmico é 2410 kg/m^3 .

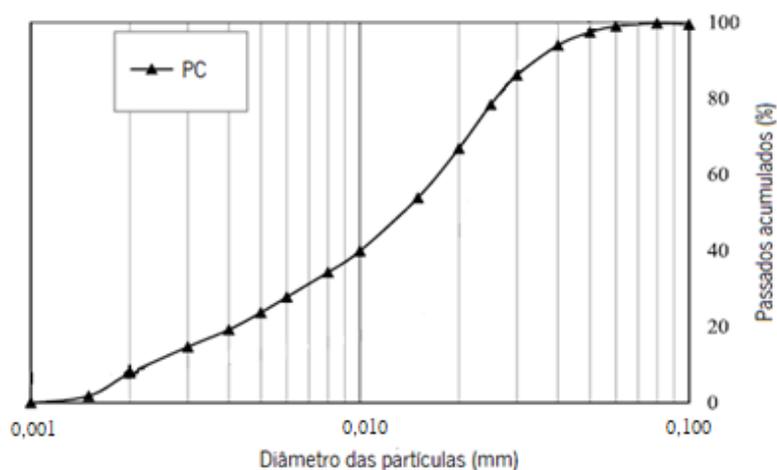


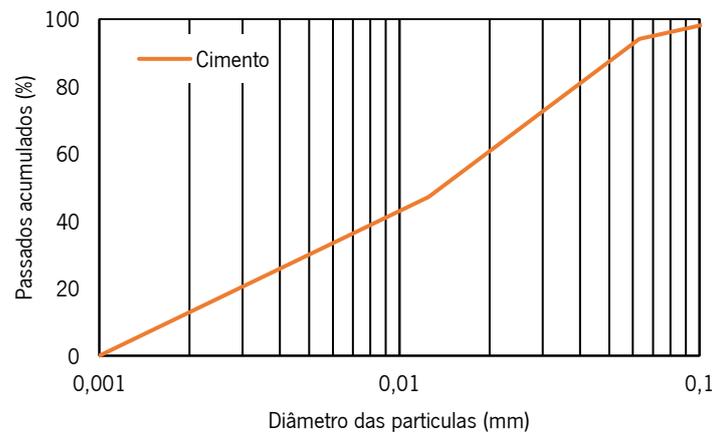
Figura 17 - Curva granulométrica pó cerâmico (Gaibor et al., 2021)

Cimento

No desenvolvimento das diversas misturas utilizou-se cimento Portland de Calcário CEM II/A-L Classe 42,5R. Este cimento fornecido pela Secil é constituído por clínquer e filler calcário e permite produzir betões de elevada resistência e trabalhabilidade. Este cimento permite ainda desenvolver rápidas e boas resistências mecânicas. A massa volúmica considerada para o cimento foi de 3110 kg/m³. A Figura 18 inclui a curva granulométrica do cimento e uma representação do cimento utilizado no presente trabalho.



a) Cimento



b) Curva granulométrica do cimento

Figura 18 - Cimento utilizado nas composições

Água e adjuvantes

A água utilizada faz parte da rede pública do concelho de Guimarães, tendo sido considerada uma massa volúmica de 1000 kg/m³.

Para além da água, foram utilizados dois adjuvantes na composição do betão, nomeadamente o controlador de viscosidade da MasterPozzolith 476N e o superplastificante com base em polímeros esterpoliacrílicos da MasterEase 3530. A introdução do controlador de viscosidade teve como objetivo aumentar a homogeneidade, a estabilidade e a coesão do betão e, conseqüentemente, melhorar a sua resistência a fenómenos de exsudação e segregação. Para melhorar as propriedades em estado fresco adicionou-se o superplastificante, visto que este adjuvante melhora a trabalhabilidade da amassadura com recurso a menores quantidades de água.

Sendo que o objetivo final desta campanha experimental passava igualmente pelo desenvolvimento de betões reforçados com fibras de aço recicladas, a questão da trabalhabilidade inerente à adição deste tipo de reforço, torna a utilização destes adjuvantes muito importante para garantir uma boa aplicabilidade do betão.

3.3.2. Composições de betão

Como mencionado anteriormente o desenho da composição das diversas misturas de betão foi elaborado com base no Método das expressões modificadas de A&A e no algoritmo de otimização desenvolvido por Pereira (2016). Cumulativamente, a seleção dos materiais e requisitos das misturas foram consideradas as inúmeras especificações abordadas no Capítulo 2.5, nomeadamente dimensão nominal máxima do agregado e quantidade máxima de adjuvantes recomendada. Nesta fase inicial da campanha experimental, pretendeu-se que os betões desenvolvessem uma trabalhabilidade elevada para que, com a adição das fibras, o betão mantivesse uma boa trabalhabilidade.

Betão de referência (B_REF)

Para se iniciar este estudo foi selecionado um betão estrutural convencional com agregados naturais como mistura de referência, B_REF, para posteriormente se desenvolverem misturas com diversos subprodutos e resíduos industriais. Com base nos parâmetros definidos na norma NP EN 206 (2013) a composição da mistura de referência foi selecionada de forma a que o betão apresentasse as seguintes características:

- Classe de resistência: C 30/37;
- Classe de consistência: S3.

A escolha da resistência à compressão teve em conta as propriedades dos betões correntemente usados nos pavimentos industriais e com as indicações da norma BS EN 13877-2 (2013), a qual refere que os betões destinados a pavimentos devem possuir uma resistência à compressão de pelo menos 20 MPa.

Para além do cimento CEM II/A-L 42,5 R, este betão continha areia fina (0-2 mm) e areia média (0-4 mm), agregado natural com fração granulométrica de 6-14 mm e 14-20 mm, plastificante e superplastificante como adjuvantes. A dosagem da mistura B_REF está representada no Quadro 15.

Quadro 15 - Dosagem da mistura B_REF

Quantidades de Materiais para 1m³			
Materiais	Massa (kg)	% material (por peso sólido)	Volume (m³)
CEM II/A-L 42,5 R	280,00	12,89%	0,090
Areia 0-2	415,00	19,11%	0,158
Areia 0-4	495,00	22,79%	0,189
Brita 6-14	552,00	25,4%	0,209
Brita 14-20	430,00	19,8%	0,162
Superplastificante	1,60	-	-
Controlador de viscosidade	1,40	-	-
Água Total	165,00	-	0,165
Volume de vazios	-	-	0,040
Volume de Betão (m³)		1,0	
Água/Cimento		0,589	
Água/Pó		0,541	

Betão com 50% de cimento (B_ASIC_50/50)

Com o objetivo de mitigar os impactos negativos relacionados com questões de sustentabilidade, os quais são recorrentemente associados ao betão convencional, procederam-se duas substituições relativamente à mistura de referência, nomeadamente, substituição parcial dos agregados naturais e substituição parcial do cimento. Assim, desenvolveu-se um betão cuja fração grossa dos agregados naturais foi substituída totalmente por ASIC com diferentes granulometrias, 0-4 mm e 0-20 mm, e cuja parte da dosagem de cimento (\approx 50% em peso) do B_REF foi substituída por pó de ASIC (0-1 mm), o que levou a uma redução de cimento de 147,51 kg/m³ (de 280 kg/m³ para 132,49 kg/m³) (ver Quadro 16). Para determinar a quantidade de água necessária, determinou-se primeiramente a água necessária para hidratar o cimento, através de uma proporcionalidade direta com B_REF, e de seguida a quantidade de água necessária para, em conjunto com o hidróxido de sódio, ativar o pó de ASIC. Visto que a quantidade de cimento é significativamente menor, a dosagem de água deixou de ser 165 kg/m³ e passou a ser 157,57 kg/m³.

A adição de areia fina à mistura deveu-se à fraca quantidade de agregados finos que o ASIC normalmente demonstra e porque, segundo a bibliografia analisada, a substituição de agregados naturais por agregados finos de ASIC pode levar a expansões indesejadas no betão e a uma maior variabilidade de propriedades mecânicas. No entanto, a dosagem de areia reduziu significativamente (de 415 kg/m³ para 254,60 kg/m³) levando a que o consumo de recursos naturais decresça. Como a substituição das

frações grossas leva a uma maior consistência de resultados, os agregados naturais grosseiros foram completamente substituídos por agregados de ASIC.

Uma vez que o ASIC é um material extremamente poroso, houve a necessidade de aumentar a dosagem de superplastificante, de 1,60 kg/m³ para 4,81 kg/m³, respeitando as quantidades máximas recomendadas pela marca a fim de não causar segregação dos elementos. Com esta metodologia, pretende-se que a trabalhabilidade esteja dentro dos intervalos admissíveis sem aumentar significativamente a quantidade de água e sem reduzir as resistências mecânicas da mistura.

A nova mistura para além da água, da areia, dos adjuvantes e do cimento, incorpora ASIC com diferentes granulometrias e hidróxido de sódio a fim de potenciar ativação alcalina do pó de ASIC (ver Quadro 16).

Quadro 16 - Dosagem da mistura B_ASIC_50/50

Quantidades de Materiais para 1m³			
Materiais	Massa (kg)	% de material (por peso sólido)	Volume (m³)
CEM II/A-L 42,5 R	132,49	5,03%	0,043
Areia 0-2	254,60	9,67%	0,097
ASIC 0-1	558,60	21,21%	0,155
ASIC 0-4	960,63	36,5%	0,275
ASIC 0-20	726,76	27,6%	0,224
Superplastificante	4,81	-	-
Hidróxido de sódio	11,10	-	0,005
Água hidratação cimento	82,50	-	0,083
Água Total	157,47	-	0,158
Volume de vazios	-	-	0,040
Volume de Betão (m³)		1,0	
Água/Cimento		0,623	
Água/Pó		0,220	

Betão sem cimento (B_ASIC_100)

Posteriormente e seguindo o mesmo racional, realizou-se uma mistura cuja totalidade da dosagem de cimento foi substituída por pó de ASIC, tendo por isso sido necessário adicionar uma maior quantidade de hidróxido de sódio para que o pó de ASIC fosse ativado alcalinamente. Pelo mesmo motivo explanado anteriormente, a quantidade de superplastificante também teve de ser aumentada para que a mistura

possuísse a trabalhabilidade desejada. Desta forma, obteve-se um betão constituído exclusivamente por ASIC, água, adjuvantes e areia (Quadro 17).

Quadro 17 - Dosagem da mistura B_ASIC_100

Quantidades de Materiais para 1m³			
Materiais	Massa (kg)	% de material (por peso sólido)	Volume (m³)
Areia 0-2	254,60	9,58%	0,097
ASIC 0-1	716,04	26,94%	0,199
ASIC 0-4	960,63	36,1%	0,275
ASIC 0-20	726,76	27,3%	0,224
Superplastificante	7,20	-	-
Hidróxido de sódio	23,90	-	0,010
Água	156,83	-	0,157
Volume de vazios	-	-	0,040
Volume de Betão (m³)		1,0	
Água/Pó		0,212	

Betão com pó cerâmico (B_CER)

Os resultados obtidos por Gaibor et al. (2021) demonstraram que o pó de cerâmico incorporado em pastas cimentícias conduz a boas resistências mecânicas. Com isto, elaborou-se um betão em que aproximadamente 20% da dosagem de cimento da mistura de referência foi substituída por pó de cerâmico. O ASIC e a areia permaneceram como agregados, tendo sido adicionada uma quantidade suplementar de pó cerâmico com o intuito de substituir a fração fina de ASIC 0-1, a qual requer um tempo de processamento, isto é moagem, mais elevado.

A análise química realizada aos resíduos cerâmicos permitiu concluir que existe uma elevada quantidade de aluminossilicatos. Assim e ao contrário do que se sucedeu nas misturas anteriores, neste betão optou-se por não fazer a ativação alcalina do pó de cerâmico visto que se perspetivou que este material conseguiria adquirir propriedades pozolânicas sem o auxílio da ativação alcalina. O Quadro 18 inclui a dosagem da mistura B_CER.

Quadro 18 - Dosagem da mistura B_CER

Quantidades de Materiais para 1m³			
Materiais	Massa (kg)	% de material (por peso sólido)	Volume (m³)
CEM II/A-L 42,5 R	226,52	46,69%	0,073
Pó de Cerâmico	258,60	10,41%	0,107
Areia 0-2	276,46	11,13%	0,106
ASIC 0-4	966,06	38,91%	0,277
ASIC 0-20	755,32	30,42%	0,232
Superplastificante	4,10	-	-
Água Total	201,26	-	0,201
Volume de vazios	-	-	0,040
Volume de Betão (m³)		1,0	
Água/Cimento		0,415	
Água/Pó		0,395	

3.4. Procedimento de ensaios

3.4.1. Abaixamento (Cone de Abrams)

Tal como a TR-34 (2018) refere, a trabalhabilidade dos betões no estado fresco deve ser aferida com recurso ao ensaio de abaixamento medido através do cone de Abrams. A metodologia adotada é preconizada pela norma NP EN 12350-2 (2019) para ensaios do betão em estado fresco.

Para realizar este ensaio foi necessário:

- Molde metálico de forma troncocónica e com uma superfície interior lisa, sem presença de pasta de cimento, rebites e mossas. Este molde deve possuir um diâmetro interno na base de 200 ± 2 mm, um diâmetro interno no topo de 100 ± 2 mm e uma altura de 300 ± 2 mm. Para manter o molde estável e fixo, este deve conter duas abas junto à base para colocar os pés e duas pegas no topo (Figura 19);
- Varão de compactação com comprimento de 600 ± 5 mm e um diâmetro de 16 ± 1 mm e com extremidades arredondadas (Figura 19);
- Funil (ver Figura 19);
- Régua com divisões menores iguais a 5 mm e graduada de 0 a 300 mm;
- Placa, rígida, não absorvente e plana sobre a qual o molde é colocado (Figura 19);
- Colher;

- Pano molhado para humedecer as superfícies dos equipamentos;
- Cronómetro com exatidão de 0,5 s.



Figura 19 - Material utilizado

O ensaio procedeu-se respeitando a seguinte sequência:

- Humedecer o molde troncocónico e a placa;
- Fixar o molde sobre a placa através das abas;
- Fasear o enchimento do molde por 3 camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde, apiladas com 25 pancadas distribuídas por toda a secção transversal da camada com o varão de compactação;
- Após compactar a camada de topo rasar a superfície do betão com o varão de compactação através de movimentos de rolamento;
- Remover os excessos presentes na placa/superfície;
- Elevar cuidadosamente e firmemente o molde durante 5 segundos;
- Todo este procedimento deve durar aproximadamente 150 segundos.

O abaixamento (h) foi determinado com a diferença entre a altura do molde e o ponto mais alto da amostra de betão que abaixou. Foi necessário verificar a simetria do abaixamento e se permaneceu substancialmente intacto para que o ensaio fosse validado. Caso existissem deformações elevadas o ensaio teria de ser repetido.

Após ser determinado o abaixamento, classificou-se a trabalhabilidade do betão de acordo com as classes de abaixamento referidas na norma NP EN 206 (2013), as quais estão indicadas no Quadro 19.

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

3.4.2. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade secante do betão em compressão, foi avaliado aos 7 dias, 28 dias e aos 90 dias. A realização deste ensaio seguiu a metodologia fixada pela norma NP EN 12390-13 (2014), sendo que a geometria e a dimensão dos provetes de ensaio seguiram as recomendações da norma NP EN 12390-1 (2012), ou seja, provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

Para realizar este ensaio foram necessários três transdutores de deslocamento, colocados simetricamente em relação ao eixo central do provete perfazendo um ângulo de 120° entre eles, assim como uma prensa hidráulica equipada com um atuador com uma rótula metálica que permitisse transferência exclusiva de esforço axial (ver Figura 20).

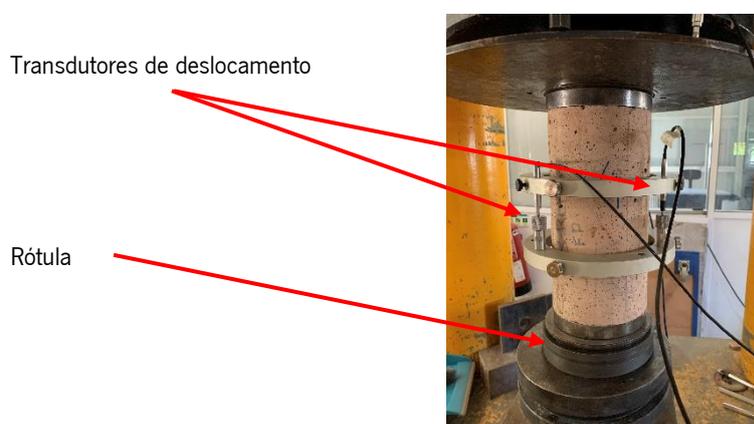


Figura 20 - Configuração do ensaio de módulo de elasticidade

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-13 (2014), segundo o seguinte procedimento:

- Determinar a resistência à compressão de um dos provetes para programar os ciclos de carga com recurso a patamares. Estes patamares (tensão superior, σ_A) caracterizam-se por ser 30% do valor da resistência à compressão à data de uma dada betonagem;
- Aplicar os transdutores de deslocamento, diametralmente opostos, no provete;
- Posicionar o provete de forma que a aplicação da carga seja a mais centrada possível;
- Aplicar a tensão de pré-carga (em todos os ensaios foi aplicada uma pré-carga de 10 kN), σ_p , durante 20 segundos e ajustar o zero dos extensómetros;
- Aplicar o 1º ciclo de tensão no provete ao ritmo de $0,6 \pm 0,2$ MPa/s, fazendo variar a tensão entre σ_p e σ_A . Manter esta tensão durante 20 segundos e calcular a extensão média registada pelos extensómetros;
- Reduzir a tensão ao ritmo de $0,6 \pm 0,2$ MPa/s até à σ_p e manter esta tensão durante 20 segundos. Calcular a extensão média registada pelos extensómetros (fim do 1º ciclo);
- Aplicar o 2º ciclo de tensão no provete;
- Realizar a 1ª verificação, a extensão determinada a partir de cada transdutor no 2º ciclo não deve diferir mais do que 20% da extensão média. Caso contrário, reposicionar o provete e reiniciar o ensaio;
- Aplicar o 3º ciclo de tensão no provete;
- Realizar a 2ª verificação, a variação da extensão do 2º ciclo para o 3º ciclo não deve diferir mais do que 10% da extensão média. Caso contrário, reposicionar o provete e reiniciar o ensaio;
- Calcular o módulo de elasticidade secante estabilizado de acordo com a seguinte equação:

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_S} = \frac{\sigma_A^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{A,3} - \varepsilon_{p,2}} \quad (7)$$

Onde:

- σ_A^m - tensão medida correspondente à tensão superior nominal;
- σ_p^m - tensão medida correspondente à tensão de pré-carga nominal;
- $\varepsilon_{A,3}$ - extensão média sob a tensão superior no ciclo de carga 3;
- $\varepsilon_{p,2}$ - extensão média sob a tensão de pré-carga no ciclo de carga 2.

Na Figura 21 está representado um gráfico tipo para obtenção de cada uma das variáveis presentes na formulação utilizada para determinar o módulo de elasticidade.

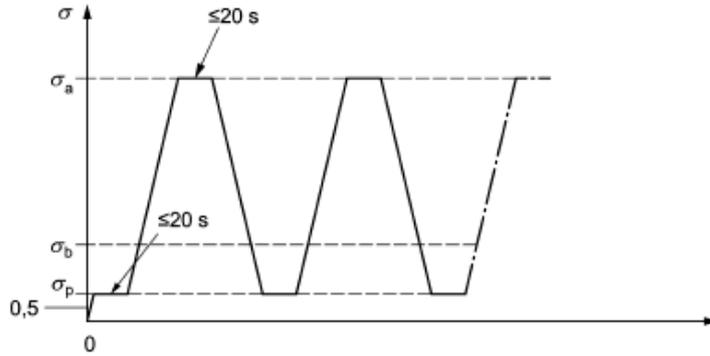


Figura 21 - Gráfico para a determinação do módulo de elasticidade (NP EN 12390-13, 2014)

3.4.3. Relação tensão - extensão

Para cada mistura e para cada idade (7, 28 e 90 dias), o procedimento adotado para obter a relação tensão - extensão consistiu na realização do ensaio de compressão uniaxial até à rotura, com medição da variação de comprimento total do provete a partir do deslocamento relativo entre pratos da prensa hidráulica.

A resistência à compressão dos referidos provetes foi determinada com base nas indicações fixadas na norma NP EN 12390-3 (2011):

- Remover o excesso de sujidade do provete e limpar todas as superfícies da máquina de ensaio;
- Centrar o provete em relação ao prato inferior com a garantia de que a carga é aplicada perpendicularmente à direção de betonagem;
- Aplicar a carga com uma deformação constante (em todos os ensaios aplicou-se uma velocidade de deslocamento de 0,005 mm/s), sem choques e de forma contínua, até que não seja possível aplicar uma carga maior, sendo que a pré-carga inicial não deve exceder 30% da carga de rotura;
- Registrar a carga máxima (F) indicada em kN;
- Avaliar o tipo de rotura do provete de modo a avaliar se o ensaio foi ou não realizado satisfatoriamente;
- Repetir todo o procedimento descrito para os restantes provetes a ensaiar.

Utilizou-se uma prensa hidráulica de 4 colunas, com uma célula de carga de 1600 kN. Antes de iniciar o ensaio foram determinadas as dimensões reais da secção transversal do provete de forma a

calcular a área na qual a força de compressão foi aplicada (A_c). A resistência à compressão (f_c) foi dada pela seguinte equação:

$$f_c = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_c} \quad (8)$$

Por último, a resistência à compressão foi expressa em MPa (N/mm^2) com aproximação aos 0,1 MPa.

As extensões (ε_c) foram obtidas a partir do deslocamento relativos das placas de carga, tendo-se utilizado três transdutores internos dispostos à volta do provete formando um ângulo de 120° entre eles e um transdutor externo para fins de validação (ver Figura 22).

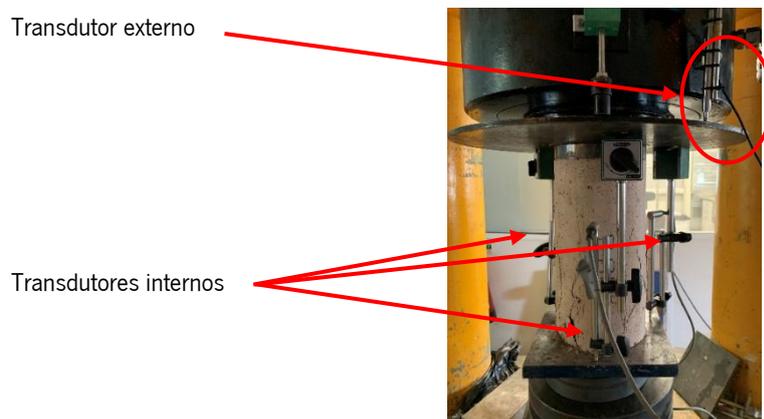


Figura 22 - Configuração do ensaio de compressão uniaxial

3.4.4. Ensaio de compressão diametral

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-6 (2011) e teve como objetivo determinar a resistência à tração do betão aos 28 dias de idade. Caracterizou-se por ser de fácil execução e por utilizar os mesmos equipamentos que o ensaio de compressão axial, tendo sido necessário utilizar adicionalmente uma estrutura de suporte dos provetes em aço, uma peça de carga em aço e faixas de cartão prensado.

Como descrito anteriormente, a geometria e as dimensões dos provetes de ensaio estavam em conformidade com a NP EN 12390-1 (2012) e a sua execução e cura foram realizadas seguindo as recomendações da NP EN 12390-2 (2009).

O ensaio realizou-se de acordo com a metodologia descrita na norma em vigor, segundo o seguinte procedimento:

- Limpar a sujidade dos provetes e de todas as superfícies da máquina de ensaio;
- Colocar o provete centrado na máquina de ensaio usando o posicionador;
- Colocar as faixas de cartão prensado e as peças de carga ao longo do eixo superior e inferior do provete, assegurando que estas se encontram paralelas durante a aplicação da carga;
- Aplicar uma carga a velocidade constante de 0,05 MPa/s até que não seja possível aplicar uma carga maior;
- Registar a carga máxima e calcular a resistência à tração por compressão diametral, através da seguinte equação:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F_{m\acute{a}x}}{\pi \times L \times d} \quad (9)$$

Onde:

- f_{ct} - resistência à tração por compressão diametral (MPa ou N/mm²);
- $F_{m\acute{a}x}$ - carga máxima (N);
- L - comprimento da linha de contacto do provete (mm);
- d - diâmetro da secção transversal (mm);

A Figura 23 representa a configuração adotada na realização do ensaio.



a) Secção longitudinal



b) Secção transversal

Figura 23 - Configuração do ensaio à tração por compressão diametral

3.5. Amassadura e betonagem

Antes de se realizar a amassadura determinou-se, para cada mistura, a água necessária para saturar os agregados. Como tal, foi necessário quantificar preliminarmente o teor de humidade presente numa massa representativa de agregados. O procedimento consistiu em recolher aleatoriamente e pesar uma amostra homogénea do agregado e sujeitá-la a um processo de secagem com duração de 5 minutos numa placa elétrica. O processo foi repetido até que a variação da massa fosse nula. Após se verificar este estado, registou-se a massa do agregado que corresponde ao estado seco da amostra (Figura 24). A quantidade de água necessária para promover a saturação dos agregados da mistura é calculada com base no teor de humidade determinado anteriormente, na massa volúmica saturada e na massa volúmica real dos agregados.



Figura 24 - Quantificação do teor de humidade dos agregados

Posteriormente, fez-se uma retificação da quantidade de água e de agregados a adicionar à mistura, adicionando ou subtraindo a quantidade de água determinada neste procedimento. As misturas foram realizadas no Laboratório de Materiais da Universidade do Minho, numa betoneira de eixo vertical com capacidade máxima de 90 litros, Figura 25.



Figura 25 - Betoneira de eixo vertical

O procedimento das amassaduras seguiu a seguinte ordem:

1. Humedecer a misturadora para não absorver a água da mistura;
2. Adicionar agregados (grossos e finos) por ordem decrescente de diâmetro máximo;
3. Adicionar a água necessária para saturar os agregados (aproximadamente um terço da água total da amassadura), evitando assim que os agregados absorvam a água necessária para a mistura, devido à sua superfície porosa (agregado de ASIC);
4. Misturar durante 3 minutos até os agregados ficarem saturados e a mistura homogênea;
5. Adicionar o cimento e as adições (pó de cerâmica ou pó de ASIC);
6. Dissolver os adjuvantes na restante água para garantir uma correta homogeneização;
7. Adicionar esta solução continuamente durante 3 minutos e com a misturadora em funcionamento;
8. Misturar durante mais 5 minutos.

A Figura 26 ilustra algumas das etapas da amassadura com a inclusão de pó cerâmico, B_CER.



Figura 26 - Procedimento das amassaduras

Realizada a amassadura e o ensaio de abaixamento, aplicou-se óleo descofrante nos moldes e realizou-se a betonagem, vibração e cura de acordo com as recomendações da norma NP EN 12390-2 (2009). Os provetes foram vibrados durante 60 segundos numa mesa vibratória, revestidos por um filme estirável para não perderem água por evaporação e guardados durante 36 horas em ambiente de laboratório de modo a adquirirem presa para serem desmoldados e transportados até à zona de cura (ver Figura 27). A zona de cura selecionada foi uma câmara climática à temperatura de 20 ± 2 °C e com uma humidade relativa de 60%. Pelo facto da mistura B_ASIC_100 possuir apenas pó de ASIC ativado alcalinamente como ligante, os provetes desta composição foram sujeitos a condições de cura diferentes. Desta forma, foi possível selecionar a que proporcionava melhor desenvolvimento das propriedades mecânicas. Por se saber *à priori* que esta mistura não iria desenvolver resistências aceitáveis para ser aplicada em pavimentos industriais, apenas se realizaram ensaios de caracterização mecânica aos 28 dias (idade de referência). Com isto, foram selecionadas três grupos de provetes com condições de cura distintas:

- 1º Grupo - Ambiente de laboratório durante as primeiras 36 horas. Posteriormente, os provetes foram armazenados numa câmara climática à temperatura de 20 °C até atingirem os 28 dias de maturidade;
- 2º Grupo - Ambiente de laboratório durante as primeiras 36 horas. Posteriormente, os provetes foram colocados numa estufa a 30 °C durante 96 horas seguindo-se 24 horas a 60 °C. Após este período, os provetes foram armazenados na câmara climática a 20 °C até atingirem os 28 dias de maturidade;

- 3º Grupo - Ambiente de laboratório durante as primeiras 36 horas. Posteriormente, os provetes foram colocados numa estufa a 80 °C durante 24 horas. Após este período, os provetes foram armazenados na câmara climática a 20 °C até atingirem os 28 dias de maturidade.



a) Moldes cilíndricos



b) Mesa vibratória



c) Provetes com filme estirável

Figura 27 - Preparação e betonagem dos provetes

De modo a evitar um mau contacto entre os provetes e os pratos dos equipamentos utilizados nos ensaios fez-se uma retificação dos provetes seguindo as indicações do Anexo A da norma NP EN 12390-3 (2011).

Na Figura 28 estão representados os provetes na câmara térmica e o equipamento utilizado na retificação dos provetes.



a) Provetes na câmara térmica



b) Retificadora de provetes

Figura 28 - Cura e retificação dos provetes

3.6. Comportamento no estado fresco

O comportamento das misturas no estado fresco foi caracterizado através do ensaio de abaixamento com o cone de Abrams. O Quadro 20 indica os resultados obtidos para a mistura B_REF, B_ASIC_50+50, B_ASIC_100, bem como para a mistura B_CER, os quais podem ser comprovados na Figura 29.

Quadro 20 - Propriedades no estado fresco

Mistura	Abaixamento (mm)	Classe
B_REF	110	S3
B_ASIC_50+50	170	S4
B_ASIC_100	11	S1
B_CER	105	S3



a) B_REF



b) B_ASIC_50+50



c) B_ASIC_100



d) B_CER

Figura 29 - Fotografias dos abaixamentos das misturas

A utilização de um módulo de distribuição q igual 0,15, no modelo de Andreasen & Andersen, A&A, mostrou-se adequado, já que as misturas B_REF, B_ASIC_50+50 e B_CER evidenciaram um bom comportamento no estado fresco. Estas misturas apresentaram um betão com trabalhabilidade satisfatória para serem aplicados em pavimentos e sem evidência de sinais de segregação.

A mistura B_ASIC_100 claramente não cumpre com os requisitos de desempenho previamente estabelecidos. A perda de trabalhabilidade que este betão apresentou deve-se fundamentalmente à elevada quantidade de ASIC presente. Como já mencionado, este material devido ao facto de possuir elevada porosidade e conseqüentemente uma grande capacidade de absorção, textura rugosa e forma angular faz com que os betões constituídos essencialmente por este resíduo percam trabalhabilidade (Soares, 2014).

3.7. Comportamento mecânico

Com recurso aos ensaios descritos anteriormente, avaliaram-se as principais propriedades mecânicas dos diferentes tipos de betão desenvolvidos, designadamente, resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade, bem como a determinação da relação tensão – extensão que caracteriza o comportamento à compressão do betão.

3.7.1. Relação tensão de compressão - extensão

A relação tensão – extensão em compressão, $\sigma_c - \varepsilon_c$, foi determinada até uma deformação bastante para além da tensão máxima, tendo sido obtida a fase de amolecimento do respetivo comportamento.

Cada mistura de betão desenvolvida neste estudo foi ensaiada aos 7, 28 e 90 dias de idade com o objetivo de estudar a variação da resistência à compressão (f_c) e das relações $\sigma_c - \varepsilon_c$ ao longo do processo de cura. A única exceção foram os provetes da mistura B_ASIC_100 que apenas foram ensaiados aos 28 dias (idade de referência) pelos motivos explicados anteriormente.

As curvas tensão - extensão de B_REF estão ilustradas na Figura 30, de B_ASIC_50+50 na Figura 31, de B_ASIC_100 na Figura 32 e de B_CER na Figura 33.

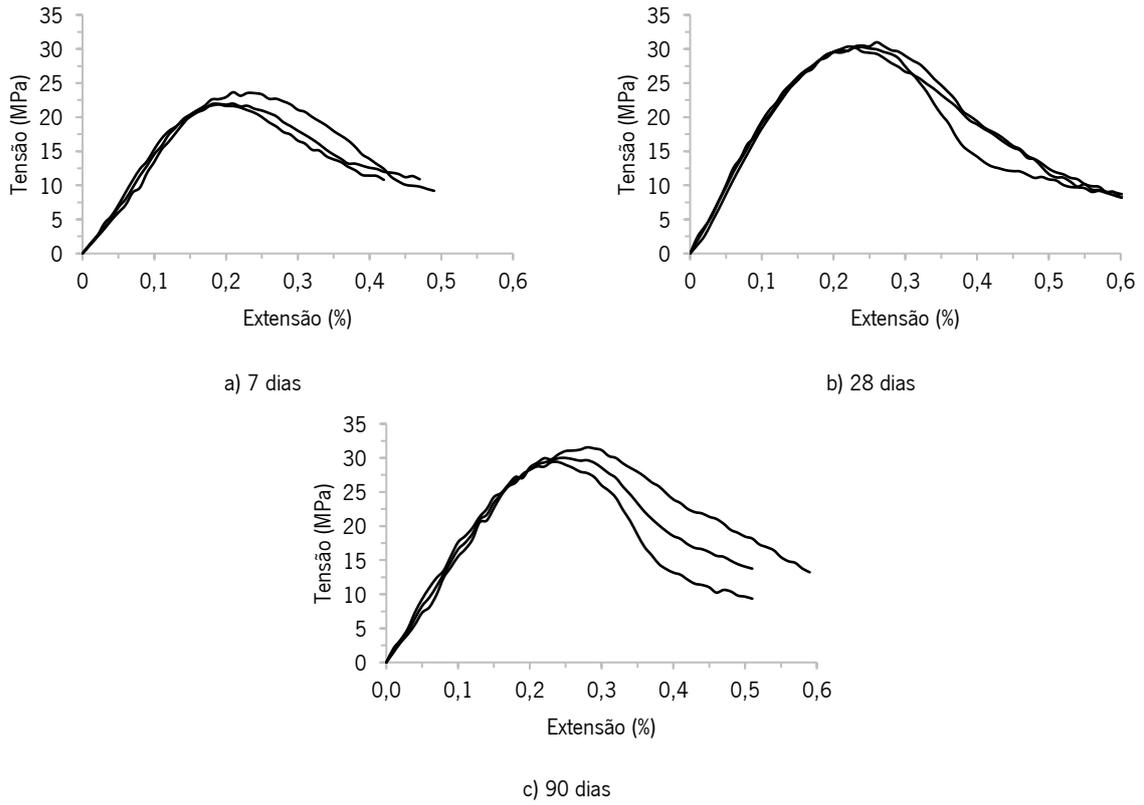


Figura 30 - Relação tensão - extensão experimental da mistura B_REF

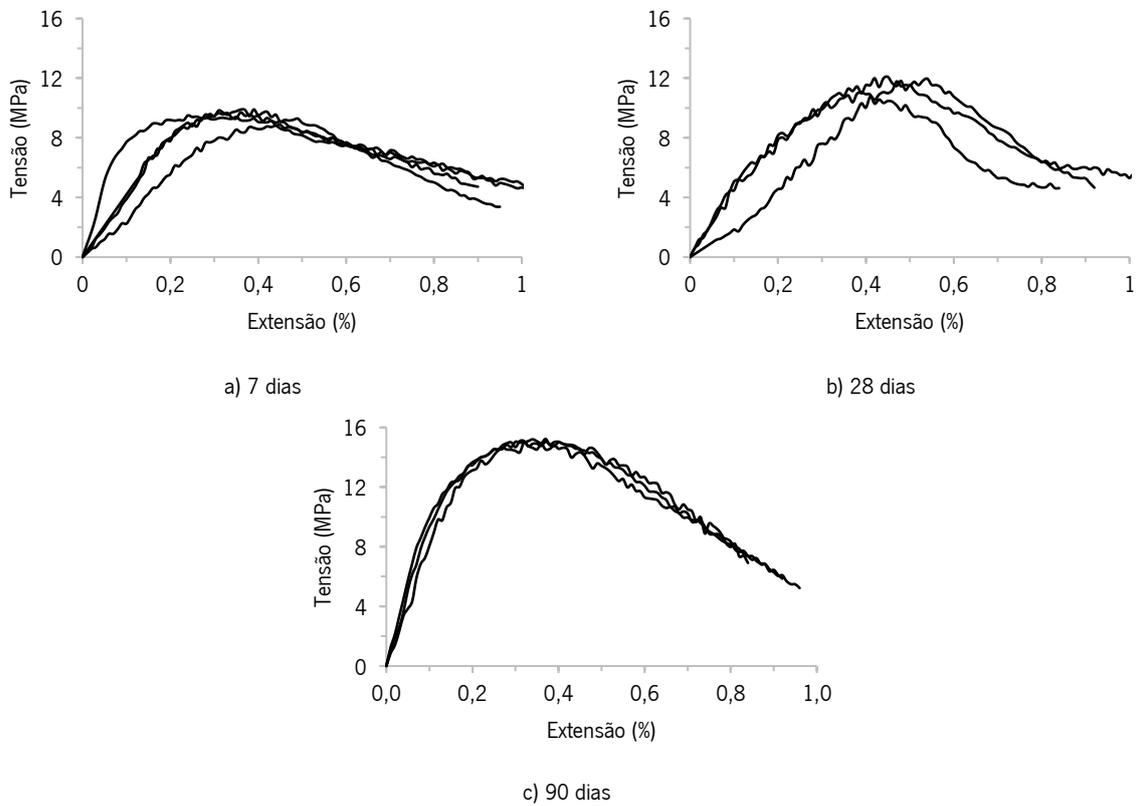
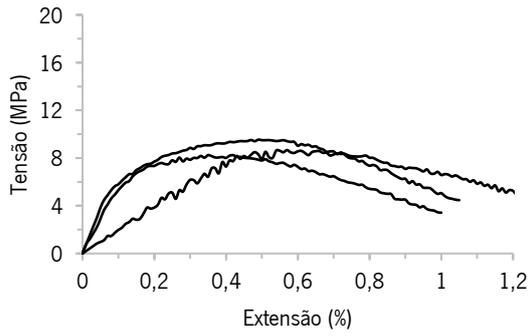
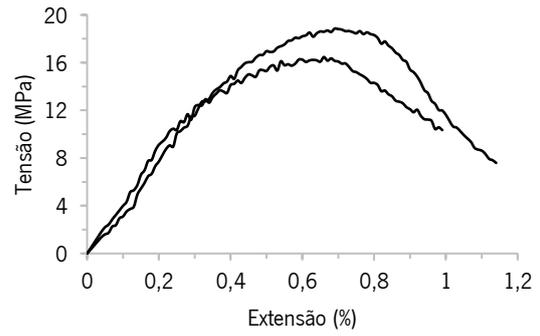


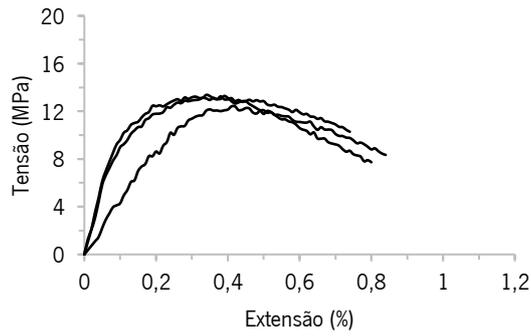
Figura 31 - Relação tensão - extensão experimental da mistura B_ASIC_50+50



a) 1º Grupo

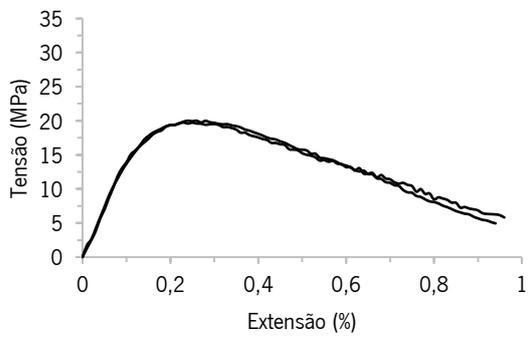


b) 2º Grupo

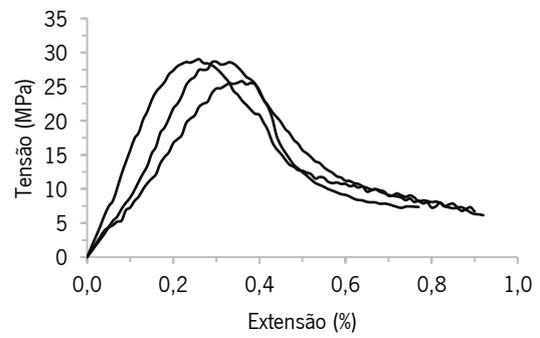


c) 3º Grupo

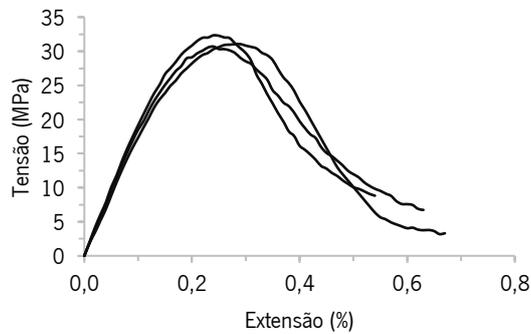
Figura 32 - Relação tensão - extensão experimental da mistura B_ASIC_100



a) 7 dias



b) 28 dias



c) 90 dias

Figura 33 - Relação tensão - extensão experimental da mistura B_CER

As resistências à compressão médias, f_{cm} , obtidas nesta fase da campanha experimental bem como as variações relativas comparativamente ao betão de referência (Δ) encontram-se expostos no Quadro 21.

Quadro 21 - Resistência à compressão média aos 7, 28 e 90 dias

Mistura	f_{cm} 7dias [MPa]	Δ (%)	f_{cm} 28dias [MPa]	Δ (%)	f_{cm} 90dias [MPa]	Δ (%)
B_REF	22,70 (3,94%)	-	30,68 (0,92%)	-	30,67 (3,59%)	-
B_ASIC_50+50	9,61 (5,01%)	-57,67	11,78 (3,92%)	-61,60	15,23 (0,67%)	-50,34
B_ASIC_100	-	-	-	-	-	-
a) 1º Grupo	-	-	8,96 (6,25%)	-70,80	-	-
b) 2º Grupo	-	-	17,82 (5,47%)	-41,92	-	-
c) 3º Grupo	-	-	13,12 (3,33%)	-50,24	-	-
B_CER	20,06 (0,57%)	-11,63	28,03 (5,03%)	-8,64	31,58 (2,12%)	+2,97

Nota: Os valores entre parênteses representam os respetivos coeficientes de variação, CoV

Observou-se que o modo de rotura de três provetes da mistura B_CER foram inadequados (i.e., dois provetes com 7 dias de idade e um com 28 dias de idade), conduzindo a uma redução da resistência. Devido a este fator, as resistências destes três provetes não foram contabilizadas para o cálculo da resistência média que consta no Quadro 21. O modo de rotura desses provetes foi semelhante ao apresentado na Figura 34.



Figura 34 - Provetes com rotura inadequada (B_CER)

Os restantes provetes obtiveram modos de rotura semelhantes aos que constam na Figura 35, constatando-se que estes foram satisfatórios.

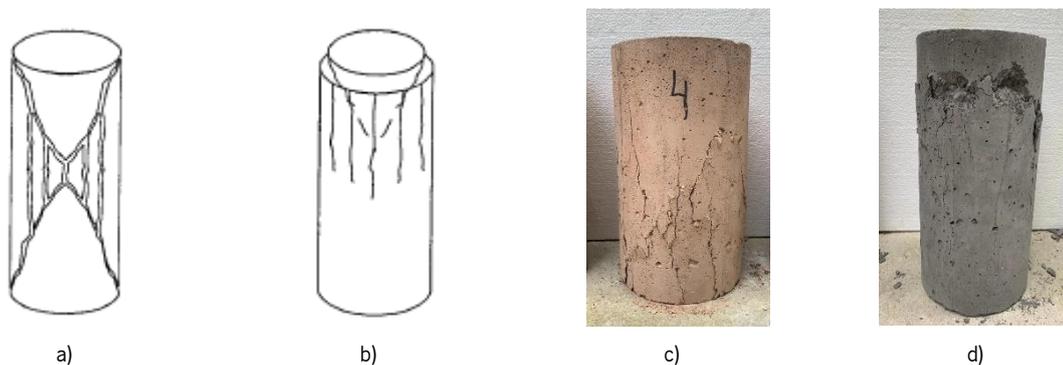


Figura 35 - Métodos de rotura: a) e b) Representação esquemática, c) modo de rotura válido para mistura com pó de cerâmico, d) modo de rotura válido para mistura com pó de ASIC

Através da análise dos gráficos tensão – extensão e dos valores obtidos é notório que a tensão à compressão média, f_{cm} , de todos os betões aumentou com a idade demonstrando que as condições de cura adotadas, nomeadamente temperatura e humidade, proporcionaram um processo de hidratação contínuo do ligante. As resistências à compressão das misturas B_REF, B_ASIC_50+50 e B_CER aumentaram, respetivamente, 35,2%, 22,6% e 39,7% entre os 7 dias e os 28 dias de idade e 0%, 29,3% e 12,7% entre os 28 dias e os 90 dias. Estas variações indicam que as misturas com pó de ASIC e com pó de cerâmico são ricas em aluminossilicatos, uma vez que as reações pozolânicas se dão em idades mais avançadas e permitem que a resistência à compressão continua a aumentar significativamente para além da idade de referência (Gaibor et al., 2021; Neves et al., 2020).

No caso da mistura B_ASIC_100 em que se adotaram diferentes condições de cura, os provetes do 2º Grupo foram os que obtiveram melhores resistências, tendo tido resistências aproximadamente 98% superiores às do 1º Grupo e 36% superiores às do 3º Grupo. Apesar destas condições terem favorecido o desenvolvimento da resistência compressiva do betão, a sua aplicabilidade em obras *in situ* não é muito viável já que é logisticamente complicado providenciar temperaturas de cura *in situ* de 60 °C, sendo que este tipo de materiais que necessitem de uma cura térmica são mais indicados para uma utilização em pré-fabricação.

As misturas cuja dosagem de cimento foi substituída, parcialmente e totalmente, por pó de ASIC (B_ASIC_50+50 e B_ASIC_100) tiveram uma redução abrupta no desempenho compressivo. Apesar da bibliografia relatar que a substituição dos agregados naturais por ASIC beneficia a resistência compressiva do betão, o mesmo não acontece quando o pó de ASIC é usado como ligante. O mau desempenho registado pode ser justificado pelo facto de o ligante não ter sido capaz de estabelecer boas ligações entre a pasta e os agregados de ASIC. No entanto, a mistura que incorpora resíduos cerâmicos

apresentou um comportamento bastante positivo e semelhante ao da mistura de referência. Desta forma, comprova-se que a elevada quantidade de aluminossilicatos no resíduo cerâmico originou reações pozolânicas que permitiram ao pó de cerâmico comportar-se como filler e como ligante. Esta propriedade aumentou a compacidade da matriz, melhorou o embricamento entre agregados e promoveu uma eficiente transferência de tensão através do esqueleto do agregado.

De acordo com a NP EN 1992 (2010), a resistência característica, f_{ck} , do betão aos 28 dias é dada pela seguinte equação:

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ [MPa]} \quad (10)$$

Assim, e tendo em consideração as classes de resistência à compressão da norma NP EN 206 (2013), tanto o betão de referência como o betão concebido com pó de cerâmico podem ser classificados como betões da classe de resistência C20/25, ou seja, o objetivo de obter um betão C30/37 não foi atingido. Apesar disto, ambos apresentam uma resistência à compressão adequada aos 28 dias de idade para serem aplicados em pavimentos industriais, sendo que as resistências do B_CER continuarão a evoluir ao longo do tempo devido às reações pozolânicas, como é visível com os valores da resistência aos 90 dias. Adicionalmente, convém esclarecer que a determinação da resistência à compressão foi realizada através de um ensaio em controlo de deslocamento, o qual conduz a valores menores de resistências do que um ensaio realizado em controlo de força. As restantes misturas não foram capazes de desenvolver resistências suficientes para serem aplicadas nesta tipologia de elementos estruturais.

3.7.2. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade mede a deformabilidade elástica que o betão sofre quando solicitado a uma determinada ação. No Quadro 22 apresentam-se os valores médios do módulo de elasticidade para cada um dos betões estudados, assim como a variação relativa ao betão de referência e o respetivo coeficiente de variação.

Quadro 22 - Módulo de elasticidade médio aos 7, 28 e 90 dias

Mistura	E_{cm} 7dias [Gpa]	Δ (%)	E_{cm} 28dias [Gpa]	Δ (%)	E_{cm} 90dias [Gpa]	Δ (%)
B_REF	24,63 (3,29%)	-	27,44 (2,99%)	-	30,80 (2,84%)	-
B_ASIC_50+50	19,23 (14,60%)	-21,92	23,70 (8,27%)	-13,63	23,08 (1,61%)	-25,06
B_ASIC_100	-	-	-	-	-	-
a) 1º Grupo	-	-	20,24 (6,09%)	-26,24	-	-
b) 2º Grupo	-	-	14,98 (7,39%)	-45,41	-	-
c) 3º Grupo	-	-	24,76 (7,80%)	-9,77	-	-
B_CER	30,81 (6,06%)	+25,09	33,44 (1,87%)	+21,87	31,92 (1,30%)	3,64

Nota: Os valores entre parênteses representam os respetivos coeficientes de variação, *CoV*

Tal como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade aumenta com a idade do betão. Neste caso, o módulo de elasticidade das misturas B_REF, B_ASIC_50+50 e B_CER aumentou entre os 7 e os 28 dias 11,4%, 23,2% e 8,5%, respetivamente. Entre os 28 e os 90 dias o módulo de elasticidade manteve-se praticamente igual (variações inferiores a 5%), com exceção de B_REF em que o módulo de elasticidade aumentou 12,2%. Para além disso, é visível que os módulos de elasticidade obtidos estão relacionados com os resultados da resistência à compressão, na medida em que resistências mais elevadas conduzem a módulos mais elevados, visto que estão ambos relacionados com a maior compacidade das misturas. É o caso dos provetes da mistura B_ASIC_50+50, cuja resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 28 dias foi de 11,78 MPa e 23,70 GPa, respetivamente, e os provetes da mistura B_CER que ao obterem uma resistência à compressão mais elevada, 28,04 MPa, alcançaram igualmente um módulo de elasticidade superior, 33,44 GPa.

Tendo por base os valores das resistências à compressão, seria esperado que o módulo de elasticidade da mistura B_CER aos 28 dias fosse menor que o da mistura B_REF. Este facto pode ser justificado por dois motivos, primeiramente, pelo facto de se ter procedido a uma redução da quantidade de cimento, o que conseqüentemente, conduzirá a um decréscimo da resistência à compressão (pelo menos aos 28 dias). Segundo, pelo facto de se ter utilizado uma quantidade mais elevada de filler, o que conduziu à obtenção de uma matriz mais compacta e com menor índice de vazios, contribuindo em regime elástico, para um maior módulo de deformabilidade. De facto, analisando o módulo de elasticidade a 28 dias de B_CER verifica-se que o seu valor é superior ao módulo de elasticidade médio definido pela norma NP EN 1992 (2010), ou seja, 30 GPa para uma classe de resistência C20/25. Por outro lado, o módulo de B_REF é aproximadamente 2,5 GPa inferior ao módulo definido pela referida norma.

3.7.3. Resistência à tração

A resistência à tração apenas foi determinada aos 28 dias de cura. O Quadro 23 apresenta os resultados obtidos para as distintas misturas. A referida resistência foi obtida através do ensaio de compressão diametral para três das misturas desenvolvidas. Pelos motivos explicados anteriormente, a mistura B_ASIC_100 não foi alvo deste ensaio.

Quadro 23 - Resistência à tração média aos 28 dias

Mistura	$f_{ctm\ 28dias}$ [MPa]	Δ (%)
B_REF	2,19 (23,09%)	-
B_ASIC_50+50	1,13 (7,78%)	-48,40
B_CER	1,49 (8,42%)	-31,96

Nota: Os valores entre parênteses representam os respetivos coeficientes de variação, CoV

Os modos de rotura dos diversos provetes foram semelhantes aos que constam na Figura 36, constatando-se que estes foram satisfatórios.



Figura 36 - Ensaio à tração por compressão diametral: Rotura Cilindros B_REF

Analisando os resultados obtidos, verifica-se uma tendência decrescente com o aumento do teor de resíduos. Este comportamento é similar ao que se tem vindo a registar nos restantes ensaios, onde taxas de substituição maiores levam à deterioração de algumas propriedades.

Constata-se também que o betão B_REF foi o que obteve o maior valor e o B_ASIC_50+50 o que registou o valor mais reduzido. Os resultados alcançados da mistura de referência estão de acordo com o preconizado na norma NP EN 1992 (2010), ou seja, uma resistência à tração média de 2,20 MPa para

uma classe de resistência C20/25. Tendo em conta que a resistência à compressão do betão B_ASIC_50+50 aos 28 dias foi de apenas 11,78 MPa, era expectável que a resistência à tração fosse também ela baixa. A substituição dos agregados naturais por ASIC e a substituição parcial do cimento por resíduos cerâmicos provocou uma redução 32%; no entanto a resistência à tração deste betão está muito próxima dos 1,70 MPa que a norma BS EN 13877-2 (2013) recomenda para as lajes de betão de pavimentos industriais.

É preciso, no entanto, analisar estes resultados com alguma prudência visto que Abrishambaf et al. (2015) indicam que as resistências à tração obtidas pelo ensaio à tração por compressão diametral são usualmente maiores do que as que são obtidas por ensaio de tração direta.

Analisando as demais investigações presentes no Capítulo 2.4, deteta-se que existe uma dispersão relevante dos resultados obtidos entre os vários estudos, existindo betões reciclados cujos valores de resistência à tração tanto são inferiores como superiores à do seu homólogo natural.

3.8. Conclusões

A substituição dos componentes do betão tem indubitavelmente benefícios económicos e ambientais, no entanto, pode resultar em menores resistências e menor trabalhabilidade em comparação com o betão tradicional. Não obstante, convém salientar que as misturas desenvolvidas neste trabalho com a inclusão de resíduos, tentaram paralelamente reduzir a quantidade de cimento Portland utilizado nas misturas. Desta forma, a comparação entre as misturas tem de ser realizada com as devidas ressalvas. Assim, é necessário equilibrar todos estes fatores a fim de alcançar um equilíbrio ótimo entre a funcionalidade dos betões estruturais e os benefícios ambientais. Com a elaboração do presente capítulo foi possível retirar as seguintes conclusões:

- Com exceção da mistura B_REF, todas as misturas contribuem para a diminuição das emissões de CO₂ e para a diminuição do consumo de agregados naturais devido à substituição de uma grande parcela dos seus constituintes naturais por grandes quantidades de agregados provenientes de resíduo e/ou subprodutos industriais;
- Apenas as misturas B_REF e B_CER obtiveram classes de resistência C20/25 e desenvolveram resistências à compressão suficientes para serem aplicadas em pavimentos industriais. As restantes misturas desenvolveram aos 28 dias resistências médias à compressão entre 8,96 e

17,82 MPa, o que as inibe de serem usadas em pavimentos industriais segundo a norma BS EN 13877-2 (2013). As restantes propriedades mecânicas estão relacionadas com os resultados da resistência à compressão, ou seja, resistências à compressão mais elevadas originam módulos de elasticidade e resistências à tração mais elevadas;

- Verificou-se que as condições de cura têm influência no desenvolvimento das resistências mecânicas dos betões cuja dosagem de cimento é totalmente substituída por ASIC. Neste caso, os provetes que foram curados num ambiente a 30 °C durante 96 horas seguindo-se 24 horas a 60 °C obtiveram uma resistência à compressão 49,7% superior do que os que foram armazenados num ambiente a 20 °C e 26,4% superior do que os que foram introduzidos durante 24h num ambiente a 80 °C;

Por fim, concluiu-se que dos betões alternativos desenvolvidos, o betão com resíduos cerâmicos, B_CER, foi o que evidenciou possuir maior potencialidade para ser reforçado com fibras de aço recicladas, FAR. O seu comportamento mecânico foi aceitável, apresentando, inclusivamente, resistência à compressão semelhante à do betão de referência aos 28 dias, sendo que aos 90 dias devido ao efeito pozolânico do filler cerâmico, as resistências à compressão foram mesmo mais elevadas que o betão de referência. No que concerne à trabalhabilidade, teria sido ideal que este betão tivesse desenvolvido um maior abaixamento, já que é expectável que a trabalhabilidade diminua com a incorporação de fibras.

4. Formulação de betão com resíduos e fibras de aço recicladas

4.1. Introdução

Tal como se constatou no Capítulo 2, a incorporação de fibras de aço discretas no betão permite aumentar a sua resistência à tração, principalmente, pós-fissuração, capacidade de absorção de energia, comportamento à fadiga e ao impacto. Além disso, este tipo de reforço mitiga a ocorrência de diversas patologias comumente observadas nos pavimentos industriais, já que contribui para a diminuição da abertura de fissura, do espaçamento médio entre fendas, assim como contribui para a integridade e uma maior durabilidade do betão. Do ponto de vista económico e ambiental, esta solução possibilita reduzir a espessura da laje do pavimento e, conseqüentemente, a quantidade de material necessário para a matriz cimentícia.

Com o compromisso de desenvolver um betão sustentável e funcional, adicionaram-se fibras de aço provenientes de pneus reciclados à mistura previamente desenvolvida com resíduos cerâmicos e ASIC (B_CER). De modo a analisar a influência que este reforço tem nesta mistura realizaram-se três misturas que se diferenciam não só pela percentagem de fibras de aço recicladas, FAR, mas também pelo tratamento a que estas fibras foram sujeitas. A primeira mistura desenvolvida (FRC_SIMP) incorpora 1%, em volume, de fibras de aço sem qualquer tratamento. Na segunda mistura (FRC_TRAT), as fibras foram previamente tratadas de forma a analisar a influência que as impurezas aderidas às FAR introduzem nas propriedades do betão. Assim, de modo a eliminar os resíduos não metálicos, as fibras foram introduzidas numa mufla a 450 °C durante quatro horas. Por fim, foi realizada uma terceira mistura (FRC_OTIM) com uma maior quantidade de fibras tratadas. As fibras desta última mistura, para além do tratamento térmico, sofreram um processo de limpeza com o objetivo de remover os produtos resultantes do tratamento térmico, i.e. cinzas, para que não influenciassem negativamente o betão.

Nas secções seguintes apresenta-se a campanha experimental para a caracterização das fibras e do betão desenvolvido com a incorporação de FAR. A campanha experimental foi constituída por: i) caracterização geométrica e mecânica das FAR, ii) processo de tratamento térmico das fibras para remover os pequenos detritos de borracha e de fibras têxteis, iii) ensaios à compressão em provetes cilíndricos, iv) avaliação do módulo de elasticidade e v) ensaios à flexão de três pontos em vigas

entalhadas. Estes ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais e no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho.

Dos ensaios à compressão foi possível obter a relação tensão - extensão (σ - ε), enquanto por intermédio dos ensaios de flexão obtiveram-se as relações força - abertura de boca de fenda (CMOD – *Crack Mouth Opening Displacement*), as resistências residuais à tração em flexão e, por fim, a lei de tração uniaxial dos BR FAR desenvolvida a partir de uma análise inversa das simulações numéricas pelo método dos elementos finitos, MEF. Devido aos cuidados que estas atividades experimentais impuseram, todos os trabalhos foram executados respeitando as normas que lhes estão associados e que serão descritas posteriormente.

4.2. Caracterização geométrica e mecânica das FAR

As FAR utilizadas no presente estudo foram fornecidas pela empresa Biogoma, Lda., sendo que o processo de reciclagem dos pneus consistiu na trituração e na separação do aço da borracha por um processo eletromagnético. Como esperado, este processo não foi capaz de remover todos os resíduos de borracha, pelo que algumas FAR continham uma pequena percentagem de fibras têxteis e de detritos de borracha aderidos à sua superfície. Adicionalmente, as FAR apresentavam geometria irregular com vários comprimentos e diâmetros (ver Figura 37). Assim, em virtude desta elevada variabilidade geométrica foi realizada uma análise estatística a 500 fibras com o intuito de se obter uma caracterização geométrica completa deste material. Procedimentos semelhantes foram adotados por diversos autores, como por exemplo Graeff et al. (2012), Köroğlu (2019) e Leone et al. (2018), no desenvolvimento de betões convencionais com inclusão de fibras de aço recicladas.



Figura 37 - Amostra de fibras recicladas

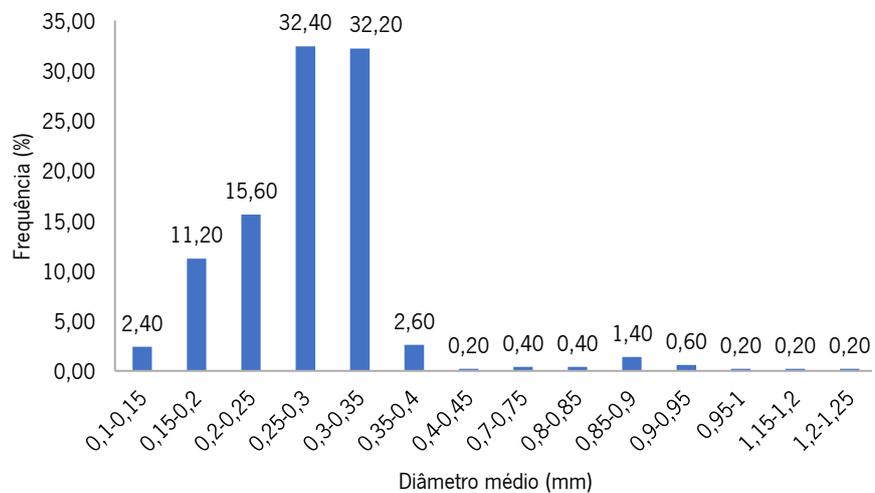
4.2.1. Parâmetros geométricos

Diâmetro

De acordo com o prescrito na norma NP EN 14889-1 (2007), o diâmetro de cada fibra foi medido através de um paquímetro, calculando a média de duas medidas realizadas nas duas extremidades e no centro da própria fibra. Os diâmetros das fibras variaram entre 0,12 mm e 1,22mm e apresentaram um valor médio de 0,29 mm e moda de 0,28 mm. Devido à elevada população (500 fibras), foram definidos 14 intervalos de frequência para a determinação do histograma, sendo que os diâmetros mais frequentes foram os que se situaram entre 0,25 - 0,30 mm (32,40%), 0,30 - 0,35 mm (32,20%) e 0,20 - 0,25 (15,60%), como mostra a Figura 38. É notório que a maioria das fibras (64,60%) possui um diâmetro entre 0,25 e 0,35, dando origem a um histograma muito central. Resultados da mesma ordem de grandeza foram observados por Koroğlu (2019) que obteve uma variação de diâmetros entre 0,15 mm e 1,80 mm, sendo que 78% das fibras tinham um diâmetro entre 0,22 mm e 0,27 mm. Simalti & Singh (2020) também obtiveram valores semelhantes.



a) Diâmetro das FAR



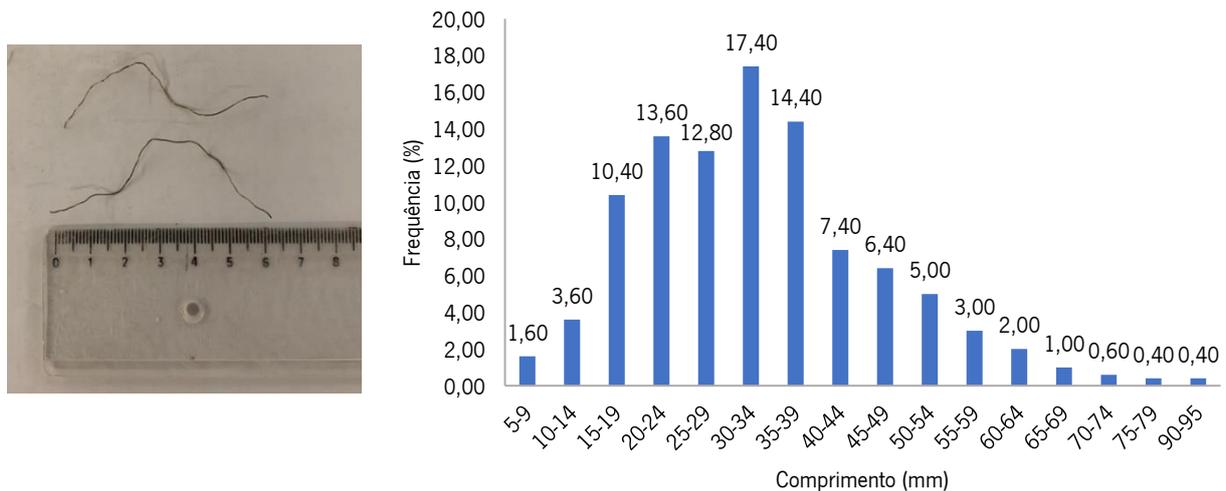
b) Frequência relativa do diâmetro das FAR

Figura 38 - Determinação e análise do diâmetro das FAR

Comprimento e comprimento desenvolvido

O comprimento da fibra, distância entre as suas extremidades, foi determinado através de uma régua graduada com a menor divisão igual a 1,0 mm, obtendo-se valores que variam entre 5,0 mm e 92,0 mm tendo como valor médio 33,2 mm. Devido à elevada amplitude de comprimentos que a amostra possuía,

o histograma foi dividido em 16 classes de comprimentos diferentes. O intervalo que inclui o maior número de fibras foi 30 - 34 mm (17,40%), seguido pelo intervalo 35 - 39 mm (14,40%) e por fim 20 - 24 (13,60%). Contrariamente ao que se sucede nos diâmetros, aqui existe uma maior dispersão de valores, resultando um histograma mais amplo (ver Figura 39).



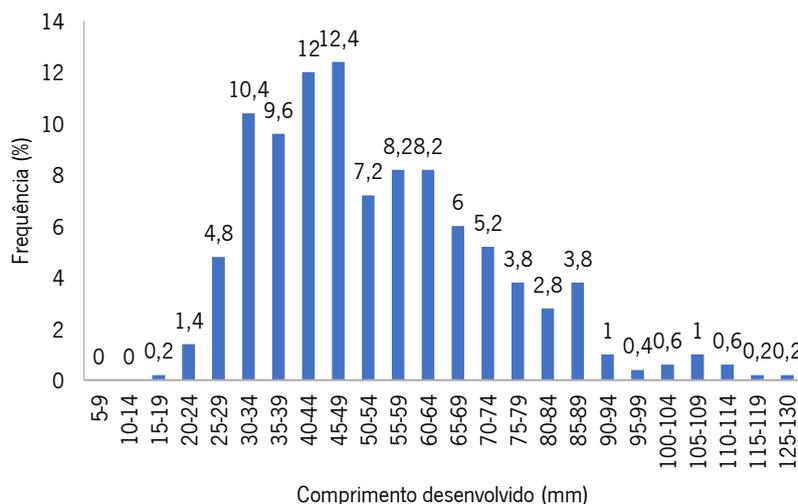
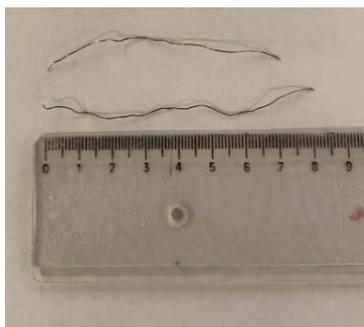
a) Comprimento das FAR

b) Frequência relativa do comprimento das FAR

Figura 39 - Determinação e análise dos comprimentos das FAR

De forma análoga, o comprimento desenvolvido da fibra foi medido utilizando um instrumento de medição similar e caracteriza-se por ser o comprimento da fibra ao longo do seu eixo. Estas medições caracterizaram-se por terem sido laboriosas devido à dificuldade em esticar as fibras. Os valores obtidos foram agrupados em 24 intervalos de frequência, de forma a que as classes deste histograma fossem iguais às do histograma da Figura 39. Assim, os intervalos 40 - 44 mm e 45 - 49 mm foram os que agruparam maior número de fibras, 12,00% e 12,40%, respetivamente (ver Figura 40). Constatou-se ainda que o comprimento desenvolvido médio é de 53,56 mm.

Comparando estes valores com os que foram obtidos em diversos estudos, nomeadamente, Caggiano et al. (2017), Graeff et al. (2012) e Leone et al. (2018), pode-se constatar que as fibras deste projeto são ligeiramente mais compridas. Estes autores obtiveram fibras com comprimentos desenvolvidos médios entre os 15 mm e os 30 mm. Esta diferença pode ser justificada com os processos de trituração distintos a que as fibras foram sujeitas, em que fase do processo de tratamento as fibras foram separadas dos demais constituintes através de processos mecânicos.



a) Comprimento desenvolvido das FAR

b) Frequência relativa do comprimento desenvolvido das FAR

Figura 40 - Determinação e análise do comprimento desenvolvido das FAR

Esbeltez e índice de curvatura

A esbeltez pode ser definida como o comprimento desenvolvido da fibra a dividir pelo seu respetivo diâmetro. De acordo com Barros et al. (2005), Lima (2012) e Samarakoon et al. (2019) as fibras com maior esbeltez mostram uma melhor eficiência na melhoria da resposta à flexão, visto que maiores comprimentos conduzem a melhores ancoragens e menores diâmetros fazem com que haja um maior número de fibras por kg. Neste estudo, a esbeltez de cada fibra foi calculada e o histograma de frequências é apresentado na Figura 41.

Esta característica geométrica apresenta valores entre 45,49 e 651,22 e um valor médio de 198,98. Comparando estes valores com os valores típicos das fibras industriais e com os valores obtidos por outros autores que se dedicaram a caracterizar as FAR, nomeadamente Hu et al. (2018) e Samarakoon et al. (2019), pode-se concluir que esta amostra apresenta valores bastante elevados já que a esbeltez média nos trabalhos enumerados foi de 100.

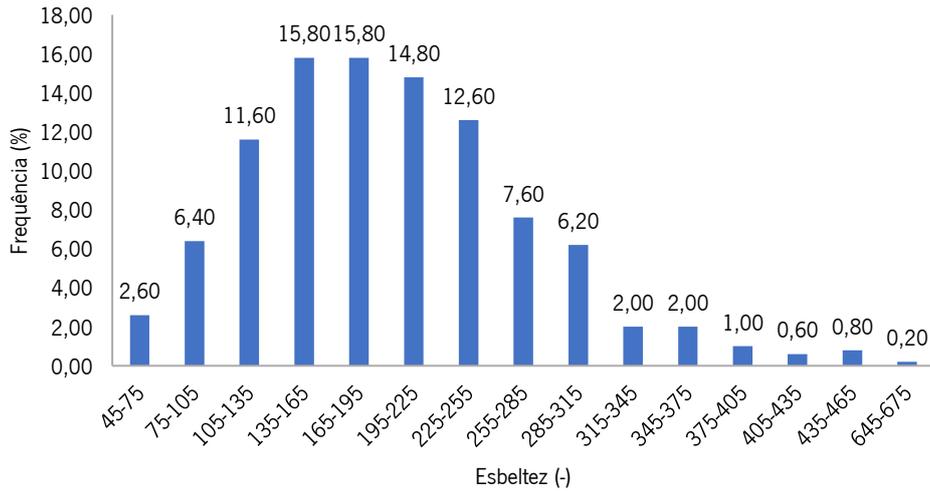


Figura 41 - Frequência relativa da esbeltez das FAR

O índice de curvatura (C_i) é um parâmetro que relaciona o comprimento e o comprimento desenvolvido. Através deste índice é possível perceber se as fibras apresentam uma curvatura elevada, no caso de o valor ser próximo de 1, ou se estão perfeitamente estiradas (C_i igual a 0). Neste estudo constatou-se que o C_i da amostra varia entre 0,05 e 0,90 e apresenta um valor médio de 0,36. Cumulativamente, a análise da distribuição de frequências permite concluir que a maioria das fibras apresenta uma curvatura pouco ou moderadamente significativa, já que o índice de curvatura de $\approx 70\%$ das fibras é menor do que 0,5 (ver Figura 42). Esta curvatura que as fibras possuem justifica o emaranhado de fibras presente na amostra, o que dificultará a sua correta distribuição durante as misturas.

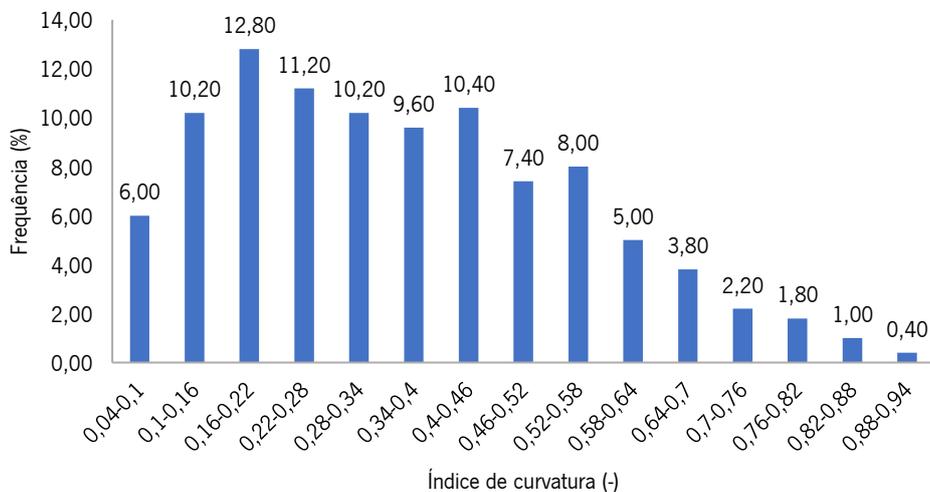


Figura 42 - Frequência relativa do índice de curvatura das FAR

No Quadro 24 consta um resumo de todas as propriedades mencionadas anteriormente, de realçar o elevado coeficiente de variação observado para os parâmetros geométricos analisados, o que reforça a variabilidade constatada de uma forma qualitativa.

Quadro 24 - Resumo das propriedades geométricas

Propriedade	Mínimo	Máximo	Moda	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação
Diâmetro [mm]	0,1	1,2	0,3	0,3	0,1	44,8%
Comprimento [mm]	5,0	92,0	33,0	33,2	13,7	41,1%
Comprimento desenvolvido [mm]	19,0	129,0	34,0	53,3	19,2	35,8%
Esbeltez [-]	45,5	651,2	225,0	199,0	77,9	39,2%
Índice de curvatura [-]	0,1	0,9	0,3	0,4	0,2	52,9%

4.2.2. Massa volúmica

Para calcular a composição do betão é fundamental determinar a massa volúmica de todos os materiais, inclusivamente das fibras de aço. A quantificação desta propriedade, permite não só obter a dosagem das fibras em percentagem volumétrica para além da quantidade em massa, assim como analisar a quantidade de impurezas presentes nas FAR.

Sendo a massa volúmica o resultado do quociente entre a massa e o volume do material (Equação 11), a massa das amostras foi pesada numa balança de laboratório com capacidade de 5000 g e precisão de 0,1 g. Por sua vez, o volume foi determinado pelo volume de água deslocada numa proveta graduada de 250 ± 1 ml. O procedimento aqui adotado foi baseado no trabalho de Simalti & Singh (2020) e pode ser visualizado na Figura 43.

Antes de iniciar o ensaio foi necessária obter nove amostragens de FAR com massas semelhantes e adicionar 210 ± 1 ml de água à proveta graduada. Nesta etapa, a água foi adicionada com recurso a um conta-gotas e a leitura foi feita pelo menisco. Posteriormente, faseou-se a imersão do material na proveta em três fases para que, em cada fase, fossem realizadas 25 pancadas para remover o ar ocluído. Por fim, fez-se a leitura do volume de água deslocado pelo menisco.

$$\rho = \frac{\text{Massa da amostra}}{\text{Volume final} - \text{Volume inicial}} \quad (11)$$



Figura 43 - Procedimento de medição da massa volúmica

O Quadro 25 apresenta os resultados obtidos para a massa volúmica da FAR obtida pelo método anteriormente descrito.

Quadro 25 - Massa volúmica das FAR

Amostra	Massa (g)	Vol. Inicial (ml)	Vol. final (ml)	Densidade (kg/m ³)
1	54,9	210	227	3229,4
2	54,3	210	226	3393,8
3	53,6	210	225	3573,3
4	51,1	210	223	3930,8
5	53,9	210	226	3368,8
6	53,8	210	225	3586,7
7	50,8	210	226	3175,0
8	51,5	210	227	3029,4
9	55,5	210	226	3468,8
Média				3417,3

Tendo em conta que a densidade das fibras industriais correntemente é de 7850 kg/m³ (Simalti & Singh, 2020), torna-se evidente que as fibras de aço fornecidas contêm uma elevada quantidade de borracha e de fibras têxteis. A presença destas impurezas pode comprometer a aderência das fibras à matriz já que a presença de borracha na superfície da fibra originará ligações débeis.

4.2.3. Processo de tratamento térmico das fibras

A fim de avaliar a influência que estas impurezas têm nas propriedades do betão foram realizadas duas misturas cujas fibras foram alvo de dois processos de tratamento: i) pré-tratamento a altas temperaturas e ii) pré-tratamento a altas temperaturas com limpeza dos resíduos não metálicos.

Para realizar o tratamento térmico, as fibras foram introduzidas numa mufla a 450 °C durante quatro horas, tendo o equipamento sido aquecido a 10 °C/min. Este tratamento térmico baseou-se nos trabalhos desenvolvidos por Frazão et al. (2019), os quais afirmam que a maior perda de massa ocorre a 450 °C. A Figura 44 ilustra o equipamento utilizado e as fibras após tratamento.



Figura 44 - Tratamento térmico

Após o tratamento térmico ter terminado constatou-se que a temperatura e o tempo definidos foram suficientes para eliminar tanto os detritos de borracha como as fibras têxteis. No entanto, verificou-se que existia uma grande quantidade de resíduos não metálicos. Como tal, as fibras utilizadas na terceira mistura (FRC_OTIM) foram alvo de uma limpeza manual que consistiu em peneirar e lavar as fibras (ver Figura 45).

Com a pesagem da amostra antes e depois do tratamento é possível quantificar qual a percentagem de impurezas através de :

$$|\% \text{ de impurezas}| = \frac{\text{Massa final} - \text{Massa inicial}}{\text{Massa inicial}} \quad (12)$$

Desta forma, obteve-se uma percentagem de impurezas, isto é, resíduos não metálicos de 14,8%. A massa volúmica considerada para as fibras tratadas foi igual à massa volúmica do aço, ou seja, 7850 kg/m³.



a) Resíduos não metálicos



b) Resíduos da peneiração



c) Lavagem

Figura 45 - Limpeza das FAR

4.2.4. Resistência à tração

As propriedades mecânicas das fibras de aço com e sem tratamento foram avaliadas através de ensaios de tração uniaxial, com intuito de se estabelecer um termo de comparação entre elas e as fibras de aço industriais, bem como avaliar o impacto do tratamento térmico na resistência das fibras.

Os ensaios de tração uniaxial foram realizados numa prensa eletromecânica (Lloyd LR50K) com uma capacidade de 50 kN. Os ensaios foram efetuados em controlo de deslocamento com uma velocidade de deformação de 20 $\mu\text{m/s}$. Antes de se iniciarem os ensaios de tração, as extremidades de cada fibra foram devidamente fixadas às amarras para garantir uma ancoragem adequada e uma pré-carga de 15 N foi aplicada com o objetivo de eliminar a curvatura presente na fibra. Desta forma, o deslocamento necessário para estirar as fibras não é contabilizado pelo transdutor. Contudo, a fibra poderá já estar sujeita a deformações elásticas, pelo deliberadamente não foi tentado determinar as deformações de cedência e últimas pelo método não o permitir realizar com rigor. Na Figura 46 está representada a rotura por tração de uma FAR.



Figura 46 - Fibra tracionada

O Quadro 26 reporta os valores médios (σ_m) e característicos (σ_k) da resistência à tração das fibras com e sem tratamento, bem como o respectivo coeficiente de variação. Admitindo uma distribuição "t-student", a resistência característica à tração foi determinada para um intervalo de confiança de 95% recorrendo à seguinte equação:

$$\sigma_k = \sigma_m - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} * s_d / \sqrt{n} \quad (13)$$

Em que $t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$ adota o valor de 2,120 dado o tamanho das amostras em causa (16 fibras sem tratamento e 16 fibras com tratamento), s_d é o desvio padrão de uma amostra aleatória com uma distribuição normal e n é o número de fibras ensaiadas.

Quadro 26 - Resistência à tração média e característica

Fibra	σ_m [MPa]	σ_k [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. Variação [%]
S/ Tratamento	1917,70	1632,73	537,67	28,04%
C/ Tratamento	979,32	898,41	152,65	15,59%

Os resultados obtidos para as fibras sem tratamento estão de acordo com os resultados experimentais relatados por Aiello et al. (2009) e Pilakoutas et al. (2004), onde uma resistência média à tração de 1900 MPa e 2300 MPa, respetivamente, foram determinadas. Além disso, a partir dos resultados obtidos é possível deduzir que, no que diz respeito à tração, as FAR sem tratamento são comparáveis às FAI já que a sua resistência à tração pode variar entre 300 e 2000 MPa consoante o tipo de aço e processos de produção utilizados (Aiello et al., 2009).

Relativamente às fibras com tratamento é notória a redução de resistência, onde se verificou um decréscimo de 48,93%. Esta diminuição pode ser justificada com o processo de tratamento adotado, especificamente com as temperaturas elevadas às quais as fibras foram sujeitas as quais conduzem à introdução de tensões residuais no aço. Deste modo, em trabalhos futuros poderá ser avaliado o potencial de utilização de temperaturas mais reduzidas no tratamento térmico das FAR.

Em ambas as fibras se constatam que a variabilidade de resultados é significativa (coeficiente de variação elevado), o que comprova a dificuldade de trabalhar com resíduos e materiais reciclados. Neste caso específico, a vasta gama de resistências pode ser atribuída ao tipo de pneu que deu origem às fibras, i.e., pneus de pesados, de ligeiros, etc.

4.3. Composições e provetes

Tendo por base a composição obtida anteriormente para o betão simples constituído por resíduos cerâmicos e ASIC, ver Quadro 18, adicionaram-se diferentes percentagens de fibras sujeitas a diferentes tratamentos para obter três misturas de betão reforçado com fibras de aço recicladas, BR FAR. As dosagens de fibras foram selecionadas de forma que a evolução do comportamento pós-fendilhação fosse perceptível.

Na primeira mistura desenvolvida (FRC_SIMP) adicionou-se 1%, em volume, de fibras sem tratamento.

A segunda mistura realizada (FRC_TRAT) foi desenvolvida com o objetivo de avaliar os efeitos que as impurezas presentes nas fibras induzem no betão. Assim, foi necessário não só tratar termicamente as fibras, como também contabilizar a quantidade de aço presente na mistura FRC_SIMP de forma a garantir a mesma quantidade de armadura em ambas as misturas. Considerando uma massa volúmica de 3417,3 kg/m³ e uma dosagem de 1% em volume, concluiu-se que para realizar 1 m³ de FRC_SIMP são necessários 34,17 kg de fibras sem tratamento. Admitindo a percentagem de impurezas de 14,8% determinada no estudo geométrico e das propriedades físico-mecânicas das FAR, então a quantidade de aço adicionada foi de apenas 29,08 kg. Atendendo a que a massa volúmica do aço é de 7850 kg/m³, então a mistura FRC_TRAT terá uma dosagem de FAR com tratamento de 29,08 kg/m³, ou seja, 0,37% em volume.

A terceira mistura (FRC_OTIM) foi concebida de forma a otimizar a mistura FRC_TRAT. As fibras foram tratadas e limpas, sendo que se adotou uma dosagem volumétrica de 0,65% (percentagem efetiva de reforço).

Devido ao facto de a mistura de controlo não ter desenvolvido uma trabalhabilidade elevada e uma vez que se previa que a adição de fibras fosse prejudicar esta propriedade do betão fresco, a quantidade de superplastificante foi aumentada em 25%, aproximadamente. As dosagens de cada uma das misturas, bem como o tipo de fibras utilizadas encontram-se no Quadro 27.

Quadro 27 - Dosagem dos BR FAR

Misturas	B_CER	FRC_SIMP	FRC_TRAT	FRC_OTIM
CEM II/A-L 42,5 R (kg/m ³)	226,52	224,05	225,46	224,83
Pó de Cerâmico (kg/m ³)	258,60	255,78	257,39	256,67
Areia 0-2 (kg/m ³)	276,46	273,44	275,17	274,40
ASIC 0-4 (kg/m ³)	966,06	955,53	961,56	958,86
ASIC 0-20 (kg/m ³)	755,32	747,09	751,80	749,69
Superplastificante (kg/m ³)	4,10	5,03	5,10	5,07
Água Total (kg/m ³)	201,26	199,06	200,32	199,76
Tipo de Fibra	-	S/ Trat.	C/ Trat.	C/ Trat. + Limp.
Fibras (%)	-	1%	0,37%	0,65%
Fibras (kg/m ³)	-	34,14	29,08	51,12

A amassadura destas misturas seguiu o mesmo procedimento anteriormente explicado na secção 3.5, mas com a adição faseada das fibras após a última etapa descrita. Esta ação foi feita com a betoneira em funcionamento e caracterizou-se por ter sido bastante prolongada pois as fibras, por estarem emaranhadas, foram separadas e introduzidas manualmente para evitar a sua aglomeração e para promover uma distribuição o mais uniforme possível (ver Figura 47).



Figura 47 - Adição das fibras

As restantes atividades descritas na secção 3.5, i.e., betonagem, vibração e cura, foram realizadas de igual forma para estas misturas. A única exceção foi a betonagem dos moldes prismáticos, para a determinação do comportamento pós-fissurado do BRFR, a qual respeitou as recomendações da norma BS EN 14651 (2005). A Figura 48 ilustra o procedimento de betonagem recomendado pela norma.

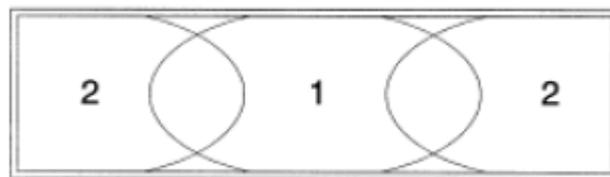


Figura 48 - Procedimento do enchimento do molde prismático (BS EN 14651, 2005)

O enchimento foi feito até cerca de 90% da altura do molde antes da compactação garantindo que a porção 1 era o dobro da porção 2, como sugerido na norma em vigor. O restante preenchimento e nivelamento foram executados durante a vibração.

Adicionalmente, para cada mistura foram betonados quatro cilindros com 150 mm diâmetro e 300 mm de altura e quatro vigas com uma secção quadrangular de 150 x 150 mm² e comprimento de 600 mm.

4.4. Procedimentos de ensaio

Os ensaios realizados para caracterizar os BR FAR foram:

- No estado fresco: ensaio de abaixamento;
- No estado endurecido: ensaio de módulo de elasticidade, ensaio de compressão uniaxial com determinação da relação tensão – extensão e ensaio à flexão em três pontos;

Com exceção do ensaio à flexão em três pontos, todos os procedimentos dos outros ensaios já foram detalhadamente descritos na secção 3.4.

4.4.1. Ensaio à flexão em três pontos

O ensaio aqui descrito realizou-se aos 28 dias de idade de cada mistura e teve como objetivo quantificar as tensões residuais em flexão dos BR FAR, bem como analisar o seu comportamento pós-fissurado. Para realizar este ensaio é necessária uma viga com secção quadrangular 150 x 150 mm² e comprimento de 600 mm simplesmente apoiada em três pontos de carga. O procedimento adotado na execução deste ensaio é definido na norma BS EN 14651 (2005).

Com o intuito de localizar a fenda a meio vão, realizou-se três dias antes do ensaio um entalhe com uma profundidade de 25 ± 1 mm e com uma largura inferior a 5 mm na face adjacente da superfície de betonagem (Figura 49). Após o entalhe, os provetes regressaram às condições de cura.

No dia do ensaio foi realizada a perfuração da viga e a inserção de cavilhas plásticas de maneira a fixar o sistema de apoio do transdutor (barra de *Yoke*). Esta barra tem como função excluir as deformações parasitas que surgem com o efeito de rotação da viga.



Figura 49 - Preparação dos provetes

Para realizar o ensaio foi necessária uma máquina servo-hidráulica de controlo fechado com rigidez suficiente para evitar instabilidades e capaz de produzir uma taxa constante de deslocamento a meio vão ou CMOD (*crack mouth opening displacement*) da amostra de ensaio. A precisão do sistema de medição do deslocamento utilizado é de 0,01 mm e a do sistema de medição de carga é de 0,1 kN.

A preparação do ensaio envolveu os seguintes passos:

- Dispor dois rolos metálicos afastados 500 mm entre si;
- Posicionar a viga sobre os apoios com o entalhe voltado para baixo, de modo a ficarem 50 mm livres em cada extremidade;
- Posicionar a meio vão o sistema de carga composto por um rolo metálico (dois destes três rolos devem ser capazes de rodar em torno do seu eixo e ter uma inclinação num plano perpendicular ao eixo longitudinal da viga);
- Fixar a barra de *Yoke* nas cavilhas previamente realizadas;
- Fixar os transdutores à máquina de ensaios e à amostra.

A Figura 50 ilustra a configuração do ensaio.



a) Posicionamento da viga



b) Equipamentos utilizados

Figura 50 - Ensaio à flexão de três pontos

Para medir a flecha a meio vão e o CMOD foram usados no total dois transdutor e duas cantoneiras. No caso da flecha, um transdutor foi fixo ao sistema de apoio e uma cantoneira foi colada na zona inferior da viga. No caso da abertura de fenda, esses equipamentos foram colados na face inferior do provete na direção longitudinal da viga. Este sistema permitiu ao êmbolo do transdutor fazer reação com a cantoneira e quando a fenda abre, o êmbolo descomprime. Um terceiro transdutor foi empregue para medir o deslocamento do atuador.

Com exceção do transdutor do atuador, os restantes transdutores apenas têm um intervalo de medição de deslocamentos de -2,5 mm a 2,5 mm, ou seja, 5 mm de campo de leitura. Assim, o ensaio apenas foi realizado para esse intervalo não tendo sido possível levar a viga à rotura completa.

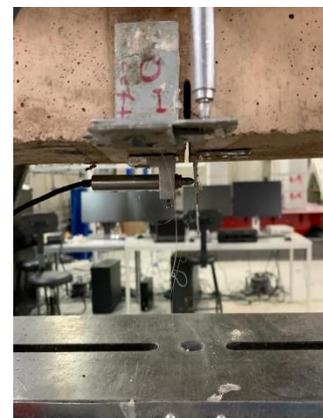
A Figura 51 demonstra os pormenores da instrumentação utilizada.



a) Transdutor do atuador



b) Transdutor a meio vão



c) Transdutor abertura de fenda

Figura 51 - Transdutores para ensaio de flexão

Com este sistema de ensaio, foram realizados para cada mistura quatro ensaios à flexão. O ensaio foi realizado em controlo de deslocamento com uma velocidade constante de $2,0 \mu\text{m/s}$.

4.5. Propriedades no estado fresco

A fim de avaliar a influência das fibras na trabalhabilidade das misturas, executou-se em todas as misturas o ensaio de abaixamento de acordo com a norma NP EN 12350-2 (2019). O Quadro 28 mostra a média dos abaixamentos para cada BRFAR e a Figura 52 ilustra a medição do abaixamento.

Quadro 28 - Propriedades no estado fresco

Mistura	Abaixamento (mm)	Classe
FRC_SIMP	25	S1
FRC_TRAT	125	S3
FRC_OTIM	55	S2



a) FRC_SIMP



b) FRC_TRAT



c) FRC_OTIM

Figura 52 - Fotografias dos abaixamentos

Considerando que o abaixamento da mistura de controlo (B_CER) foi 105 mm, constata-se que a adição de fibras teve um efeito negativo na trabalhabilidade das misturas FRC_SIMP e FRC_OTIM. Comparativamente com a mistura de controlo, a trabalhabilidade destes betões diminuiu 76,2% e 47,6%, respetivamente.

A influência do aumento da dosagem de superplastificante apenas foi visível no FRC_TRAT. Este betão apesar de possuir a mesma quantidade de aço que a FRC_SIMP, desenvolveu um abaixamento quatro vezes superior, comprovando que os resíduos não metálicos têm um efeito negativo na trabalhabilidade dos BR FAR. A trabalhabilidade obtida no FRC_OTIM reforça esta afirmação, já que esta mistura apesar de conter uma quantidade superior de fibras (em massa) conseguiu atingir um abaixamento superior à mistura com a inclusão das fibras não tratadas. Cumulativamente, este compósito comprova que a adição de grandes quantidades de FAR, independentemente de possuírem resíduos não metálicos, conduzem a uma perda de trabalhabilidade. A perda de trabalhabilidade pode também ser causada pelo aumento da fricção entre os constituintes do betão e as FAR, as quais possuem elevada esbelteza e, conseqüentemente, elevada superfície específica. De facto Barros (1995) refere que a trabalhabilidade dos betões reforçados com fibras é prejudicada quando as fibras são adicionadas em grandes percentagens e quando possuem elevada esbelteza. Esta diminuição da trabalhabilidade com a introdução de FAR nas matrizes foi igualmente obtida por Aiello et al. (2009), Koroglu (2016) e Samarakoon et al. (2019).

Por fim, é possível concluir que a mistura FRC_TRAT possui trabalhabilidade suficiente para ser aplicada em pavimentos industriais. O abaixamento do compósito FRC_OTIM encontra-se no limite da gama de valores admissíveis sugerida pela TR-34 (2018), ver Quadro 7, e a mistura FRC_SIMP não possui trabalhabilidade suficiente para ser aplicada nesta tipologia de elemento construtivo.

4.6. Propriedades mecânicas

Com recurso aos procedimentos de ensaios descritos anteriormente, esta fase teve por objetivo avaliar o desempenho mecânico dos betões reforçados com fibras de aço recicladas, BR FAR, e apurar se estes possuem as propriedades necessárias para serem aplicados em lajes de betão de pavimentos industriais.

4.6.1. Relação tensão – extensão

O ensaio à compressão com determinação da relação tensão – extensão foi realizado após 28 dias de cura seguindo um protocolo customizado, assim como algumas das recomendações da norma NP

EN 12390-3 (2011). As resistências médias de cada BRFAR constam no Quadro 29, bem como a variação do desempenho mecânico em relação ao betão de controlo (Δ_{MC}).

Quadro 29 - Resistência à compressão aos 28 dias

Mistura	$f_{cm\ 28\ dias}$ [MPa]	Δ_{MC} (%)
B_CER	28,03 (1,4%)	-
FRC_SIMP	25,83 (1,6%)	-7,9%
FRC_TRAT	19,82 (2,0%)	-29,3%
FRC_OTIM	18,48 (4,3%)	-34,1%

Nota: Os valores entre parênteses representam os coeficientes de variação, *CoV*

A Figura 53 ilustra as curvas médias tensão de compressão - extensão da mistura de controlo e dos BRFAR desenvolvidos. Na Figura 54 são apresentadas as curvas de cada um dos provetes testados correspondentes às três misturas desenvolvidas reforçadas com FAR.

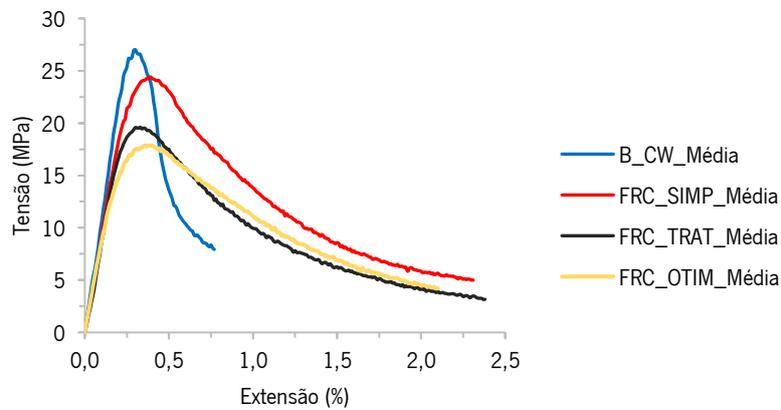


Figura 53 - Curvas tensão - extensão médias

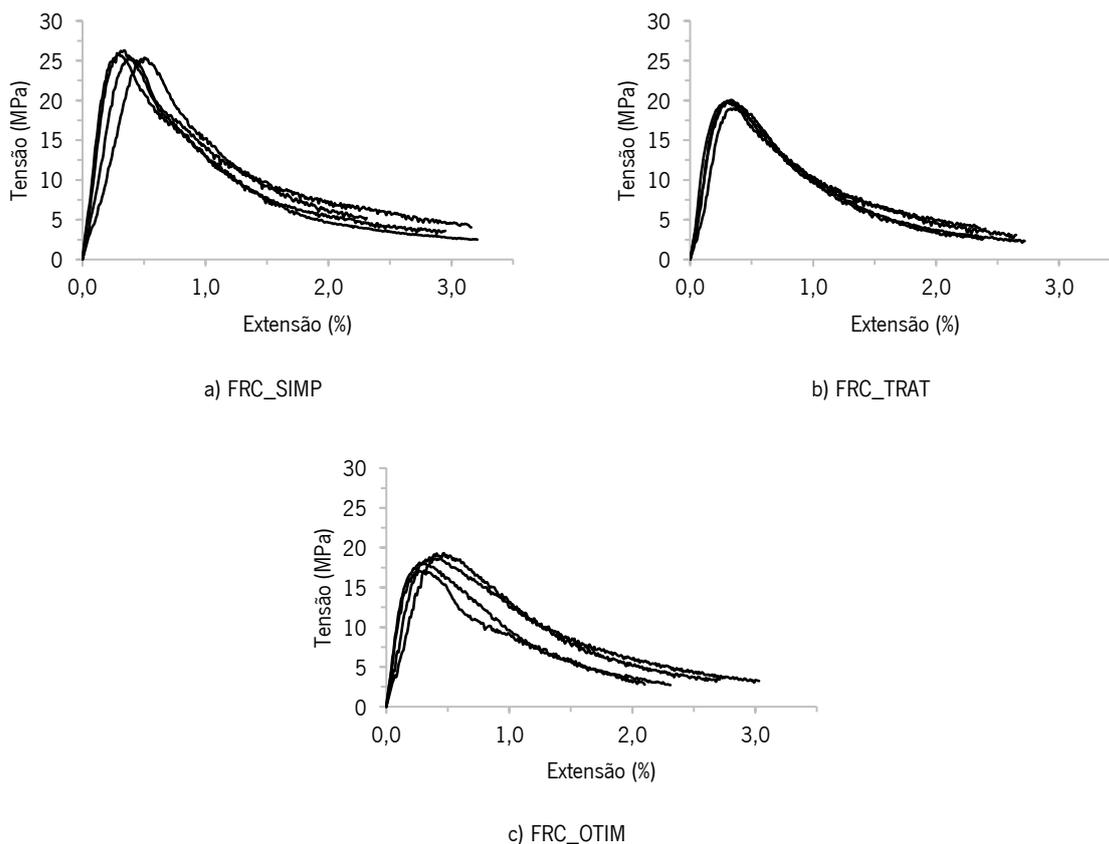


Figura 54 - Curvas tensão - extensão individuais

De acordo com os resultados, verifica-se que a mistura FRC_TRAT e FRC_OTIM obtiveram uma redução da resistência à compressão bastante mais acentuada em comparação com a mistura de controlo, 29,3% e 34,1%, respetivamente. No que concerne à mistura FRC_TRAT, a presença de uma quantidade superior de água na mistura pode ter sido um dos motivos que originou esta redução e o elevado abaixamento que foi aferido no estado fresco. Apesar de se terem determinado os teores de humidade dos agregados no dia anterior à betonagem, as condições climáticas alteraram-se significativamente entre a realização do ensaio e a amassadura. Sendo o ASIC um material muito poroso e bastante sensível à água e humidade, estas alterações induziram uma quantidade excessiva de água levando a que a razão a/c aumentasse e que as propriedades mecânicas diminuíssem. Por outro lado, o decréscimo da resistência mecânica de FRC_OTIM pode ser justificado pelo aumento significativo da quantidade de fibras tratadas adicionada e pela facilidade que estas possuíam em interligar-se. De facto, durante a adição das fibras tratadas constatou-se que estas emaranhavam-se com maior facilidade do que as fibras sem tratamento. Estes dois fatores podem ter aumentado significativamente a percentagem de vazios da mistura o que conduziu a uma diminuição da resistência do betão. Aiello et al. (2009) para dosagens de 0,15% e 0,19%, em volume, também obteve resistências à compressão entre 11,46% e

17,50% menores do que as do betão de referência. Também Cunha (2010) obteve uma redução da resistência compressiva com o aumento da dosagem de fibras de aço industriais. Neste caso, alterar a quantidade de fibras de 30 kg/m³ para 45 kg/m³ fez com que a resistência à compressão diminuísse 19,37%.

Através dos valores do Quadro 29 pode-se notar que a resistência compressiva do compósito FRC_SIMP, não se alterou significativamente, tendo-se determinado um decréscimo de apenas 7,85%. A resistência aqui determinada está em concordância com o que a bibliografia existente defende, ou seja, para percentagens volumétricas de fibras reduzidas, a resistência do compósito deverá ser da mesma grandeza da correspondente propriedade apresentada pela matriz (Barros, 1995; V. M. Cunha et al., 2008; Hu et al., 2018).

Analisando o ramo de amolecimento das curvas tensão – extensão médias (Figura 53) é notório o efeito do reforço das fibras, pois a resposta pós-fissurada é bastante mais dúctil do que a do betão simples. Este comportamento é semelhante nos três tipos de fibras de aço utilizados, sendo mais evidente na mistura FRC_SIMP. Desta forma, é possível concluir que as fibras têxteis também contribuíram para o reforço da matriz conduzindo a um ramo de amolecimento mais suave.

Os principais modos de rotura ocorridos nos ensaios efetuados estão ilustrados na Figura 55.



Figura 55 - Modos de rotura no ensaio de compressão

A capacidade de carga dos provetes que desenvolveram o modo de rotura MR 1 foi garantida principalmente pelo contacto entre os cones e pelo atrito entre as superfícies de rotura. Os provetes com menor resistência desenvolveram, de forma geral, um modo de rotura semelhante ao MR 2. Segundo

Barros (1995), este modo de rotura ocorre nos provetes com menores quantidades de fibras. Quando se desenvolveram inúmeras fendas devido ao aumento do volume do provete e não ocorreu nenhuma superfície de rotura principal, estamos perante um modo de rotura MR 3. Por fim, o modo de rotura MR 4 ocorreu para provetes mais resistentes e com maior percentagem de fibras. Neste modo de rotura uma das partes manteve-se coesa enquanto a face oposta desenvolveu um cone. Uma eventual concentração de fibras numa das extremidades do provete pode justificar este modo de rotura (Cunha, 2010).

4.6.2. Módulo de elasticidade

No Quadro 30 são expostos os valores médios do módulo de elasticidade para cada um dos BR FAR desenvolvidos, assim como a variação percentual relativa ao betão de controlo sem a adição de fibras. A determinação do módulo de elasticidade neste tipo de betões com reforço tem como objetivo principal verificar se a matriz possui propriedades similares à do betão de referência sem reforço.

Quadro 30 - Módulo de elasticidade aos 28 dias

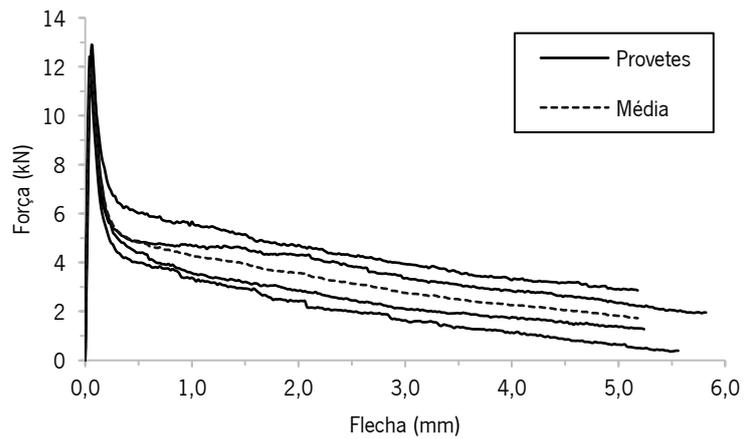
Mistura	$E_{cm\ 28\ dias}$ [GPa]	Δ_{mc} (%)
B_CER	33,44 (1,9%)	-
FRC_SIMP	30,53 (3,4%)	-8,7%
FRC_TRAT	24,76 (2,3%)	-26,0%
FRC_OTIM	25,35 (8,2%)	-24,2%
Nota: Os valores entre parênteses representam os coeficientes de variação, CoV		

De acordo com os resultados, pode-se constatar que a variação do módulo de elasticidade é similar com a variação da resistência à compressão. No caso do compósito FRC_SIMP conclui-se que a matriz deste compósito manteve as características da mistura de controlo. Em oposição a isto, o módulo de elasticidade das restantes misturas comprova que a matriz destes betões variou consideravelmente quer pelo aumento da dosagem de água, quer pelo aumento do número de vazios.

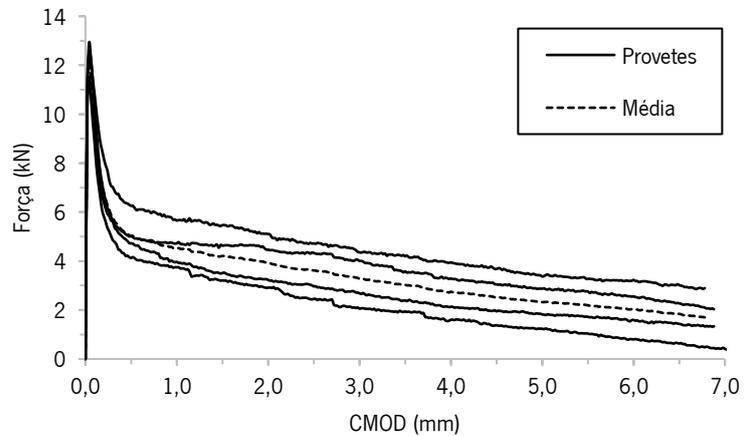
Uma vez que as resistências à compressão entre séries tomam valores bastante divergentes, não é possível concluir a influência que os resíduos não metálicos têm no módulo de elasticidade. No entanto como as partículas de borracha possuem menor rigidez do que os restantes constituintes do betão, seria expectável que estes resíduos tivessem um efeito negativo no módulo de elasticidade (Alsaif et al., 2018), o qual não foi observado no presente estudo.

4.6.3. Ensaio à flexão em três pontos

Nas Figura 56, Figura 57 e Figura 58 apresentam-se os gráficos força – flecha bem como os gráficos força – CMOD de cada um dos provetes. Além disso, na Figura 59 é feita uma comparação direta entre as curvas médias de cada uma das séries para os gráficos força – flecha e força – CMOD.

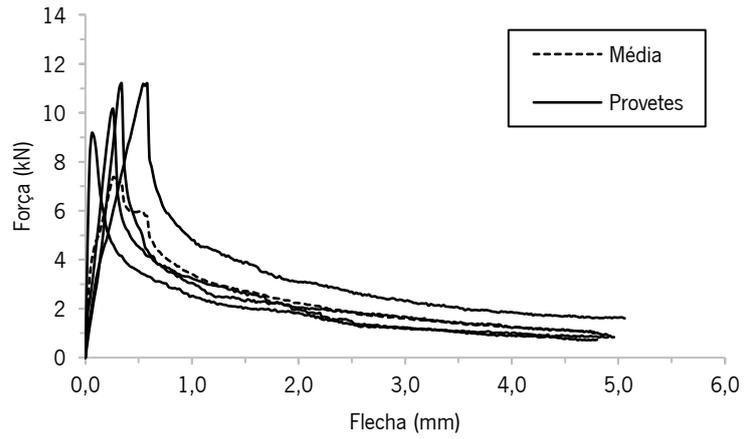


a) Curva Força – Flecha da série FRC_SIMP

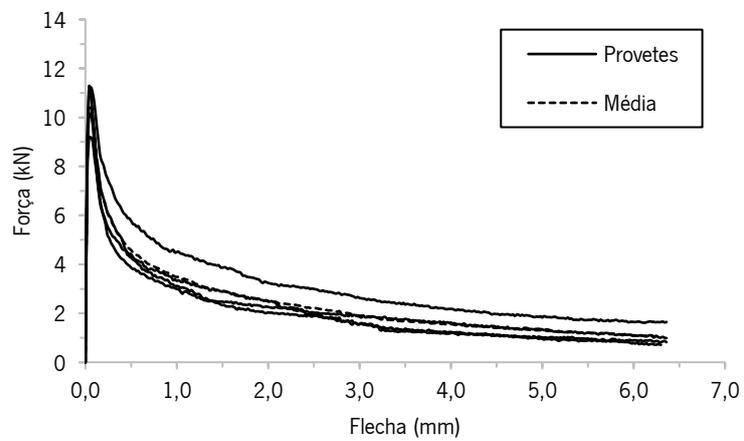


b) Curva Força – CMOD da série FRC_SIMP

Figura 56 - Curvas experimentais do ensaio à flexão: FRC_SIMP

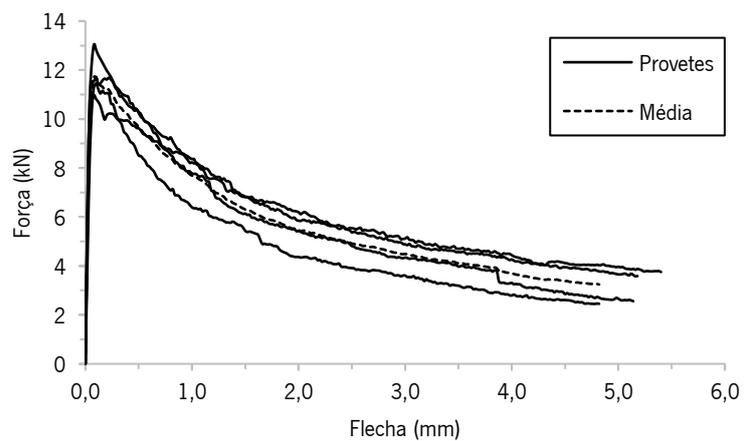


a) Curva Força – Flecha da série FRC_TRAT



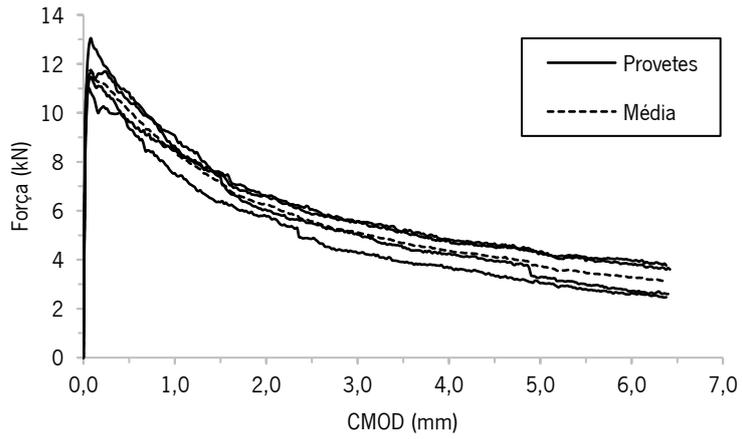
b) Curva Força – CMOD da série FRC_TRAT

Figura 57 - Curvas experimentais do ensaio à flexão: FRC_TRAT



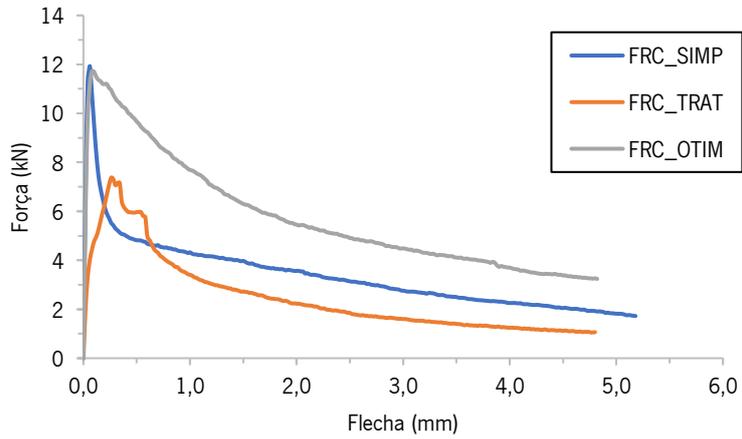
a) Curva Força – Flecha da série FRC_OTIM

Figura 58 (continua) – Curvas experimentais do ensaio à flexão: FRC_OTIM

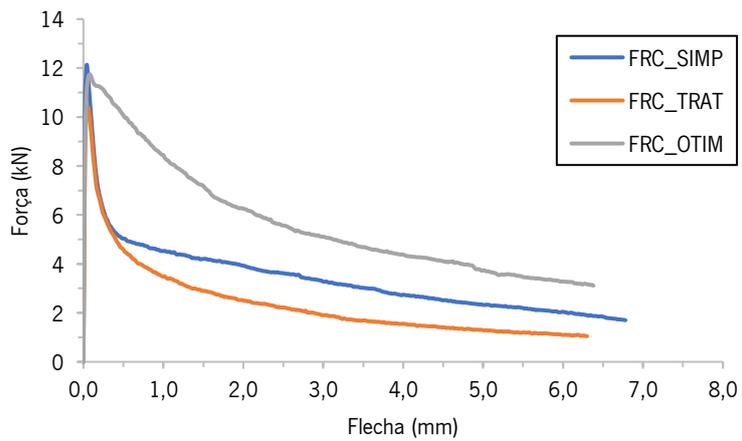


b) Curva Força – CMOD da série FRC_OTIM

Figura 58 (continuação) – Curvas experimentais do ensaio à flexão: FRC_OTIM



a) Curvas média força – flecha das diferentes séries



b) Curvas médias força – CMOD das diferentes séries

Figura 59 - Curvas médias força – flecha e força – CMOD

Durante a execução dos ensaios da série FRC_TRAT ocorreu um problema técnico no transdutor de medição de flecha que o inibiu de medir a deformação a meio vão. Como tal, foi necessário utilizar os valores obtidos pelo transdutor do atuador para realizar o traçado das curvas $F - \delta$ desta série. Uma vez que este transdutor não estava incorporado na barra de *Yoke*, as deformações parasitas que surgem com o efeito de rotação da viga não foram eliminadas fazendo com o que a fase pré-pico destas curvas apresente um comportamento irregular.

Apesar desta circunstância, pelas restantes figuras apresentadas observa-se que as relações $F - \delta$ e $F - \text{CMOD}$ têm uma evolução semelhante, sendo que através da análise das curvas é igualmente possível constatar que quando o pico de carga é atingido, a força decresce sendo observada uma fase de amolecimento.

Através da análise das curvas força – abertura de fenda na boca do entalhe ($F - \text{CMOD}$), foi também possível avaliar o comportamento pós-pico por intermédio de alguns parâmetros relacionados com a sua resistência residual relacionada com o comportamento pós-fissurado. Um dos parâmetros analisado foi resistência residual à tração por flexão. Esta resistência permitiu identificar o comportamento do material a um determinada CMOD e foi calculada com recurso à Equação 14 proposta pela norma EN 14651 (2005).

$$f_{R,i} = \frac{3F_{R,i}l}{2b \cdot h_{sp}^2} \quad (14)$$

Onde:

- $f_{R,i}$ – Tensão residual correspondente a CMOD_i ;
- $F_{R,i}$ – Valor da força correspondente a CMOD_i ;
- b – Largura da secção transversal da viga (150 mm);
- h_{sp} – Altura da secção transversal da viga na zona do entalhe (125 mm);
- l – Comprimento do vão (500 mm);

Os valores de $f_{R,i}$ foram calculados para os valores de força correspondentes a quatro distintos níveis de CMOD : $\text{CMOD}_1 = 0,5$ mm, $\text{CMOD}_2 = 1,5$ mm, $\text{CMOD}_3 = 2,5$ mm e $\text{CMOD}_4 = 3,5$ mm. Sendo que $f_{R,1}$ e $f_{R,3}$ são os de maior interesse, uma vez são estas as resistências utilizadas no dimensionamento de estado limite de serviço e último, respetivamente.

O Quadro 31 inclui as forças máximas (F_L) e os valores médios das tensões residuais obtidas a partir dos ensaios de flexão. Além disso, está também incluído o número de fibras (N_F) nas superfícies da fenda. Para realizar a contagem das fibras foi necessário submeter a viga a uma força suficiente para que esta desenvolvesse uma rotura completa. De seguida utilizou-se uma grelha de 5 por 5 desenhada diretamente sobre a secção transversal de corte de cada metade (ver Figura 60).

Quadro 31 - Parâmetros obtidos para cada uma das séries

Mistura		N_F [-]	F_L [kN]	$f_{R,1}$ [MPa]	$f_{R,2}$ [MPa]	$f_{R,3}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]
FRC_SIMP	Média	341	12,20	1,61	1,34	1,16	0,97
	CoV	11,50%	4,86%	15,31%	21,44%	25,83%	29,84%
FRC_TRAT	Média	223	10,60	1,46	0,92	0,71	0,54
	CoV	5,18%	8,29%	15,74%	20,81%	19,69%	25,25%
FRC_OTIM	Média	452	11,87	3,22	2,30	1,78	1,50
	CoV	9,34%	6,58%	5,91%	6,80%	8,26%	11,25%



Figura 60 - Grelha utilizada para contar as fibras

As tensões residuais mostraram um aumento considerável com o acréscimo do número de fibras. No que diz respeito à tensão $f_{R,1}$ da série FRC_OTIM, observou-se um aumento de 100,00% e 120,55% em relação às séries FRC_SIMP e FRC_TRAT, respetivamente. Também $f_{R,3}$ de FRC_OTIM revelou um aumento de 53,45% e 150,70% comparativamente aos compósitos FRC_SIMP e FRC_TRAT. O aumento observado é apenas atribuído ao maior número de fibras que interseccionam o plano de fenda, uma vez que para a série FRC_OTIM há mais 32,55% fibras a atravessar o plano de fenda do que para a série FRC_SIMP e 102,69% do que para a série FRC_TRAT.

É igualmente possível concluir que a série FRC_SIMP desenvolveu tensões residuais ligeiramente superiores à série FRC_TRAT. Os fatores que podem ter contribuído para este fenómeno são: i) o maior

número de fibras no plano da fenda (era espectável que o número fosse idêntico), ii) a contribuição das fibras têxteis presentes na série FRC_SIMP e iii) o comportamento micro-mecânico distinto das fibras de cada série, ou seja, a menor resistência à tração que as fibras da série FRC_TRAT possuem, poderá ter originado uma redução da ductilidade do compósito, pois, eventualmente, o modo de rutura das fibras, principalmente das fibras com maior comprimento e que intersejam a fenda com uma inclinação maior, poderá ter sido a cedência em vez do deslizamento.

Na Figura 61 estão representadas as relações experimentais médias entre a abertura de fenda (CMOD) e a deflexão a meio vão (flecha) para os diferentes compósitos desenvolvidos.

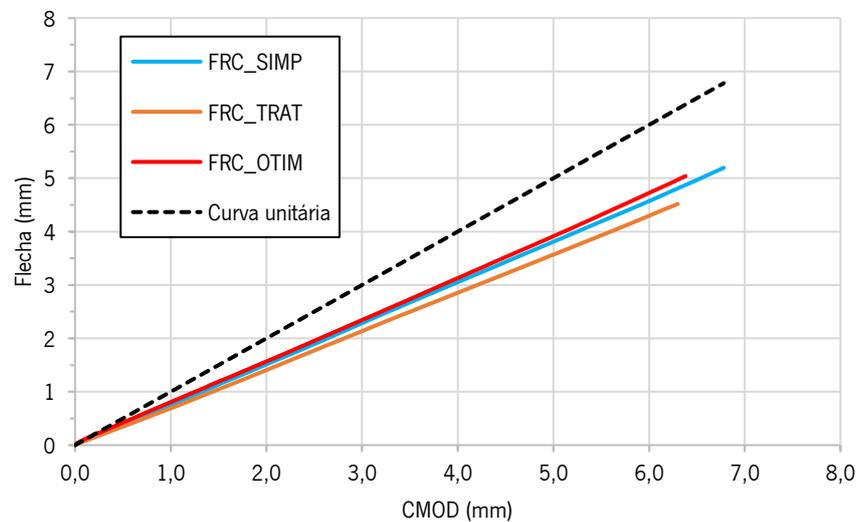


Figura 61 - Curvas médias flecha - CMOD

Comparando as relações entre séries, para a mesma flecha foi observada uma abertura de fenda menor para as séries que desenvolveram resistências residuais maiores, ou seja, FRC_OTIM e FRC SIMP. Isto era esperado, uma vez que a abertura da fenda será tão menor quantas mais fibras estiverem presentes na fenda (Cunha, 2010). A colocação do transdutor para medir o CMOD a meio do entalhe evitou que os valores fossem influenciados pela localização deste aparelho. Caso o transdutor estivesse num dos lados do entalhe e a abertura de fenda fosse distinta em ambos os lados da viga, os valores do CMOD poderiam estar enviesados devido a uma eventual segregação das fibras.

4.6.4. Análise inversa

Nesta secção, a lei de tração uniaxial dos BR FAR foi obtida por análise inversa considerando os resultados do ensaio à flexão. Desta forma, a resposta força – flecha ($F - \delta$) das vigas são simuladas através do programa de elementos finitos FEMIX (Azevedo et al., 2003). O algoritmo utilizado neste programa está dividido em quatro níveis. O primeiro nível é designado por “Entrada de dados”, onde as condições geométricas e de fronteira são introduzidas e os parâmetros que definem o comportamento de tensão pós-fissuração do material são definidos. No segundo nível ocorre a simulação numérica do teste experimental onde, através de uma análise de elementos finitos não linear, obtém-se a resposta $F - \delta$ numérica. Posteriormente, no nível três é avaliada a exatidão desta resposta numérica. A avaliação é feita com base na comparação entre a curva numérica força – deflexão e a correspondente curva experimental. Se a diferença entre as áreas sob cada uma das curvas for menor que o valor de erro predefinido, o procedimento iterativo termina. Caso contrário, um novo conjunto de parâmetros é atualizado e verificado. Finalmente, no quarto nível são obtidos os valores dos parâmetros que conduziram ao menor erro e que cumprem com as restrições impostas para o valor máximo da carga e correspondente deflexão.

Devido à geometria, condições de apoio e de carga do ensaio à flexão, foi assumido um estado plano de tensão instalado na viga. Por definição, um elemento estrutural prismático está sob um comportamento de tensão plana se uma das dimensões for significativamente menor do que as restantes. Apesar da largura e altura da secção transversal da viga serem iguais, é viável supor que este estado de tensão é válido, uma vez que para além das áreas de carregamento serem reduzidas, a componente de tensão ortogonal ao plano de carga é de importância marginal quando comparada com os componentes de tensão que caracterizam um estado plano de tensão (Cunha, 2010). Para modelar o provete nas partes onde a fissuração não ocorre utilizou-se uma malha de elementos finitos contínuos constituída por oito nós com comportamento linear elástico. No local onde surge fissuração, como surgem descontinuidades e o material deixa de se homogéneo e contínuo, recorreu-se a um elemento de interface constituído por seis nós. A Figura 62 representa a malha utilizada.

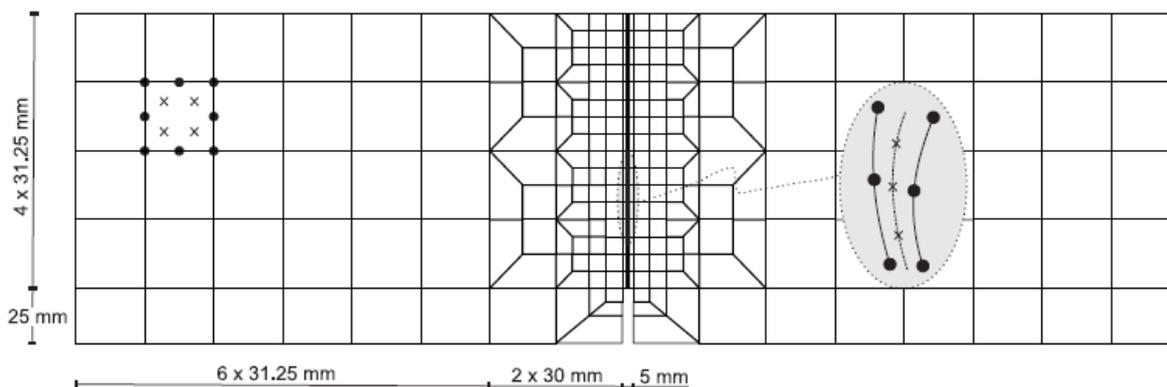


Figura 62 - Malha de elementos finitos utilizada na simulação do ensaio à flexão (Cunha, 2010)

Os valores dos parâmetros que definem o comportamento linear-elástico dos diferentes materiais nas análises inversas estão incluídos no Quadro 32.

Quadro 32 - Propriedades dos materiais

Propriedade	Mistura		
	FRC_SIMP	FRC_TRAT	FRC_OTIM
Densidade	$\rho = 2,4 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$		
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,20$		
Módulo de elasticidade	30530 MPa	24760 MPa	25350 MPa

Nas Figura 63, Figura 64 e Figura 65 estão representadas tanto as curvas experimentais como as curvas numéricas $F - \delta$ para as diferentes séries. A concordância entre a curva numérica e a experimental é considerável para todas as séries, o que indica que a relação trilinear tensão – abertura de fenda ($\sigma - \omega$) foi capaz de simular com precisão o comportamento pós-fissurado dos BRFA.

Os parâmetros obtidos da relação $\sigma - \omega$ e o respetivo erro, estão indicados no Quadro 33. À primeira vista, é evidente que os parâmetros $\sigma - \omega$ obtidos para a série FRC_TRAT são bastante diferentes comparativamente às outras séries, o que poderá ser constatado de seguida com a representação gráfica.

Quadro 33 - Parâmetros obtidas através da análise inversa

Mistura	f_{ct} [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	ω_1 [mm]	ω_2 [mm]	ω_u [mm]	G_f [N/mm]	erro [%]
FRC_SIMP	2,428	0,556	0,231	0,05	1,90	6,40	2,17	8,55
FRC_TRAT	0,550	0,902	0,253	0,15	0,57	5,10	2,28	3,78
FRC_OTIM	1,800	1,152	0,576	0,10	0,95	6,40	4,02	0,30

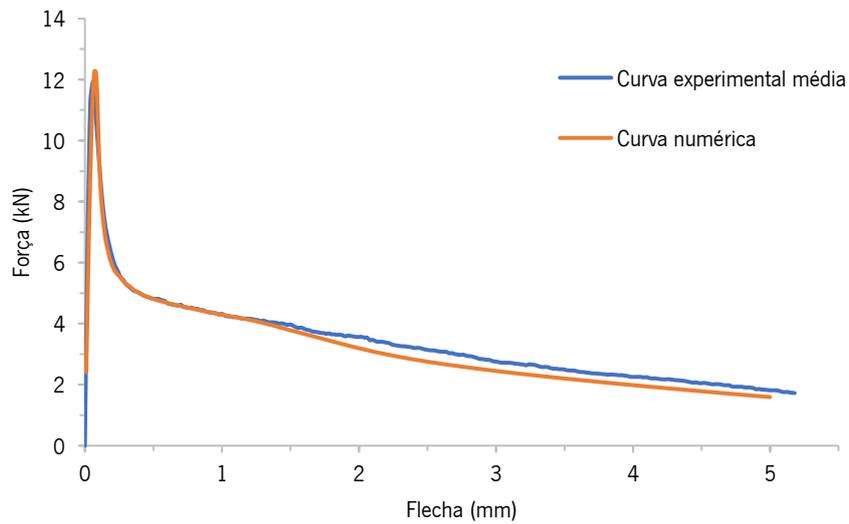


Figura 63 - Simulação numérica do ensaio à flexão: série FRC_SIMP

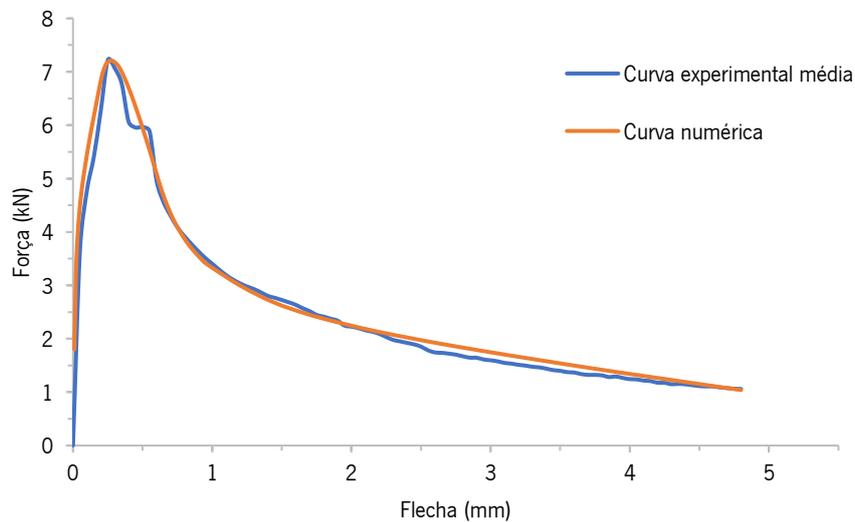


Figura 64 - Simulação numérica do ensaio à flexão: série FRC_TRAT

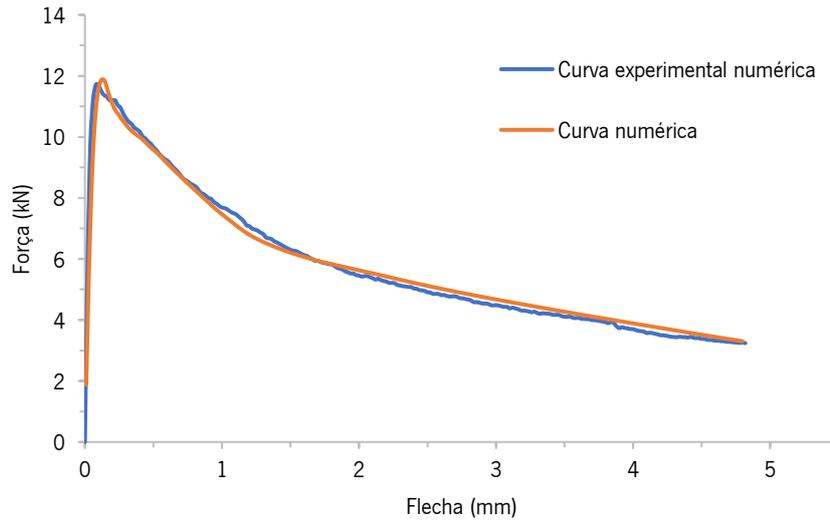
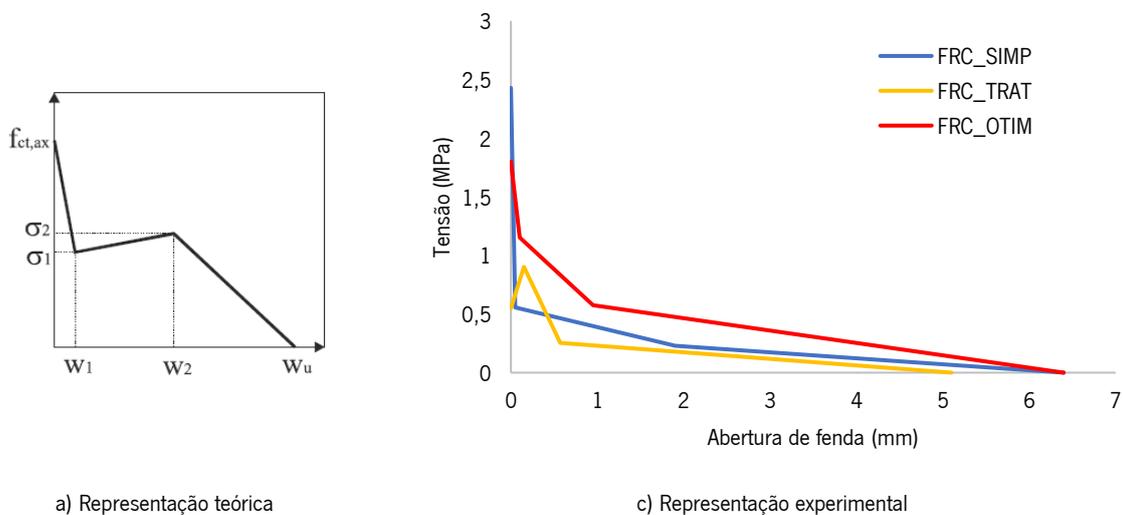


Figura 65 - Simulação numérica do ensaio à flexão: série FRC_OTIM

As Figura 66(a) e 66(b) incluem a representação teórica e experimental da lei $\sigma - \omega$, respectivamente. O valor encontrado para f_{ct} na série FRC_SIMP é superior à resistência à tração encontrada nos ensaios à tração por compressão diametral do betão simples B_CER ($f_{ct} = 1,49$ MPa). Para a série FRC_OTIM, a simulação numérica forneceu um valor de f_{ct} em conformidade com a resistência à tração do seu homólogo. No caso da série FRC_TRAT, a menor resistência à tração obtida é posteriormente compensada com um endurecimento por deformação no primeiro ramo pós-fissura (ver Figura 66).



a) Representação teórica

c) Representação experimental

Figura 66 - Lei tensão - abertura de fenda obtida pela análise inversa

Nas leis $\sigma - \omega$ obtidas pela análise inversa observa-se um decréscimo acentuado após a tensão de pico, indicando que a quantidade de fibras é reduzida para fazer face à libertação de energia produzida pela fissuração da matriz. A série FRC_OTIM apresentou uma energia de fratura significativamente maior do que as outras séries, isto é, FRC_SIMP e FRC_TRAT, as quais na realidade possuíam a mesma quantidade de fibras metálicas por metro cúbico.

Pode-se afirmar que apenas com um conhecimento completo do comportamento do material existe a possibilidade de uma estimativa correta da energia de fratura e, conseqüentemente, da capacidade limite real da estrutura.

4.6.5. Comentário final

Após adicionarem-se fibras de aço provenientes de pneus reciclados a uma mistura cujas dosagens de agregados naturais e de cimento foram substituídas parcialmente por ASIC e por pó de cerâmico, respetivamente, realizou-se um vasto programa experimental com o compromisso de desenvolver um betão dotado de carácter iminente sustentável para o setor da construção, em particular, focado numa aplicação em pavimentos industriais. Com a elaboração do presente capítulo foi possível retirar as seguintes conclusões:

- Apesar dos resíduos não metálicos terem sido completamente eliminados no tratamento térmico das fibras, a temperatura e o tempo definidos evidenciaram terem sido demasiado elevados, uma vez que as propriedades mecânicas, nomeadamente resistência à tração, sofreram uma redução bastante elevada;
- A utilização de diferentes teores e tipos de fibras forneceram diferentes propriedades quer no estado fresco, quer no estado endurecido ao betão. Assim, como esperado, os resultados obtidos foram maioritariamente função do tipo de fibra e da dosagem;
- A trabalhabilidade do betão fresco diminuiu com o aumento do volume de fibras. No entanto, as séries cujas fibras não continham resíduos não metálicos evidenciaram melhores trabalhabilidades do que as que continham detritos de borracho e fibras têxteis;
- Os resultados dos ensaios de compressão registaram algumas anomalias, o que provocou uma grande dificuldade na avaliação e interpretação dos mesmos. A maior anomalia encontrada deve-se ao facto de os betões ensaiados terem apresentado valores significativamente diferentes, apesar de o desenho da matriz ter sido o mesmo. Apesar disto é possível concluir que a

resistência à compressão foi reduzida com a adição de FAR graças ao aumento da porosidade do betão;

- Os resultados dos ensaios de obtenção do módulo de elasticidade seguiram a mesma tendência da referida anteriormente, tendo os resultados sido fixados abaixo do esperado;
- A presença de fibras recicladas melhora o comportamento pós-fissurado do betão. É igualmente possível concluir que a série FRC_OTIM, que possui uma maior dosagem de fibras, desenvolveu tensões residuais ligeiramente superiores às outras séries. Para além do maior número de fibras no plano da fenda, este aumento pode ser justificado com o comportamento mecânico distinto das fibras de cada série;
- Através das curvas tensão – extensão, obtidas através do ensaio à compressão, e das curvas força – flecha, obtidas através dos ensaios à flexão, é possível concluir que os BR FAR mostraram maior ductilidade do que o betão simples.

Por fim, conclui-se que a incorporação de FAR em betões é viável e constitui uma solução económica, uma vez que as FAR possuem um custo mais baixo em comparação com as FAI (Simalti & Singh, 2020), e sustentável, pois permitem reutilizar os níveis de resíduos depositados em aterro. É, no entanto, necessária a realização de mais estudos de modo que a utilização de FAR na indústria da construção seja viável e mais recorrente.

5. Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros

5.1. Conclusões gerais

Este trabalho teve como principal objetivo contribuir para redução dos níveis de deposição de resíduos industriais ou provenientes da construção e da demolição de edifícios em aterros sanitários, através da sua reutilização para desenvolvimento de soluções ou produtos dotados de caráter iminente sustentável para o setor da construção, em particular, focados numa aplicação em pavimentos industriais.

Face a este propósito, numa primeira fase desenvolveu-se um conjunto de misturas em que se procedeu à substituição de uma grande parcela dos seus constituintes naturais por grandes quantidades de agregados provenientes de subprodutos industriais. Adicionalmente, pretendeu-se também verificar a possibilidade da substituição de cimento Portland por pó de ASIC com o intuito de tornar as composições o mais sustentáveis possíveis.

O desenvolvimento destes betões caracterizou-se por ter sido bastante complexo e exigente. A elevada porosidade, textura rugosa e angularidade que os resíduos possuem, conduziu a uma redução na trabalhabilidade dos betões. A adição de uma maior quantidade de finos e de água, necessária para compensar a superior superfície específica, poderia ter resolvido esta adversidade, uma vez que os agregados passariam a ter um meio que facilitaria a sua movimentação. Porém, esta decisão levaria a que a relação a/c aumentasse consideravelmente e as propriedades mecânicas diminuíssem, conseqüentemente. Mantendo a relação a/c baixa, o problema da trabalhabilidade poderia ser ultrapassado com a incorporação de maiores dosagens de superplastificante e/ou plastificante. No entanto, estes aditivos quando adicionados em grandes quantidades podem originar segregação ou excesso de porosidade conduzindo, uma vez mais, a uma redução das resistências mecânicas do betão produzido.

O resultado obtido com a realização dos ensaios de caracterização do betão no estado endurecido permitiu concluir que a resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração diminuem com a incorporação de resíduos na matriz do betão. Este decréscimo foi bastante evidente nas misturas cuja dosagem de cimento foi substituída por pó de ASIC, como seria de esperar. O betão com resíduos cerâmicos e agregados de ASIC, B_CER, foi o que evidenciou possuir maior potencialidade

para ser reforçado com FAR, visto que se manteve uma quantidade significativa de cimento Portland por m³ da mistura de referência (cerca de 80%). O seu comportamento mecânico foi aceitável, apresentando, inclusivamente, resistência à compressão e módulo de elasticidade semelhantes aos do betão de referência, - 8,64% e +21,87% aos 28 dias, respetivamente.

Antes de iniciar a segunda fase da campanha experimental, realizou-se uma caracterização geométrica e mecânica às fibras de aço provenientes de pneus reciclados. Destes trabalhos concluiu-se que as fibras possuíam uma heterogeneidade de geometrias bastante elevada, uma resistência à tração semelhante às FAI e uma quantidade de resíduos não metálicos considerável. De forma a eliminar estes resíduos, aplicou-se um tratamento térmico que se caracterizou por ter sido demasiado prolongado e por ter sido realizado a uma temperatura demasiada elevada, i.e. 450 °C, uma vez que a resistência à tração reduziu cerca de 50%.

Posteriormente, pretendeu-se avaliar os benefícios do ponto de vista do comportamento mecânico da utilização de FAR como reforço de betão, tendo sido desenvolvido um conjunto de séries com diferentes quantidades fibras e com diferentes processos de remoção de resíduos não metálicos. Através do ensaio de abaixamento, concluiu-se que a trabalhabilidade do betão reduz com a incorporação de FAR. A facilidade que as fibras possuem em emaranharem-se e a esbelteza elevada que as caracteriza podem ter sido os fatores que conduziram a esta redução. Apesar disto, as séries cujas fibras não continham resíduos não metálicos evidenciaram melhores trabalhabilidades do que as que continham detritos de borracho e de fibras têxteis. Os ensaios realizados no estado endurecido permitiram depreender que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade diminuíram consideravelmente graças ao aumento da porosidade e ao aumento da quantidade de água intrínseca nos agregados. Apesar disto, este reforço proporcionou um aumento da capacidade de absorção de energia, da ductilidade e das resistências residuais dos compósitos. Os resultados obtidos pelo ensaio à flexão permitem concluir que quantas mais fibras estiverem presentes na superfície de fenda, melhores serão as resistências residuais.

Ainda que o comportamento no estado fresco das misturas desenvolvidas ainda esteja longe de permitir a sua aplicação em pavimentos sem vibração, a aplicação convencional é viável e os resultados obtidos são promissores. O balanço final do estudo desenvolvido é extremamente positivo, uma vez que, face à informação recolhida e às limitações deste trabalho, tudo leva a indicar que os resíduos utilizados, ASIC, pó cerâmico e FAR, possuem elevado potencial para serem usados como alternativas ao cimento, agregados naturais e FAI na produção de betões estruturais. Assim, o presente projeto contribuiu,

seguramente, para o aumento do conhecimento técnico-científico desta temática que ainda é muito reduzida.

5.2. Desenvolvimentos futuros

De modo a dar continuidade ao estudo até aqui realizado existem vários temas que poderão ser explorados, dos quais se enumeram:

- Estudo detalhado do desenho das composições realizadas, a fim de se realizar uma campanha de ensaios mais alargada e mais incisiva nas propriedades associadas ao surgimento de patologias nos pavimentos, nomeadamente retração, fluência e penetração de agentes agressores;
- Estudar detalhadamente a variabilidade de propriedades no estado fresco e endurecido de um betão com incorporação de ASIC;
- Estudo do efeito conjunto de fibras de aço provenientes de pneus reciclados e de fibras de vidro recicladas adicionadas ao betão;
- Procurar desenvolver um sistema de articulação entre documentos normativos internacionais e nacionais, na área específica dos pavimentos.

6. Bibliografia

- Abrishambaf, A., Barros, J. A., & Cunha, V. M. (2015a). Tensile stress–crack width law for steel fibre reinforced self-compacting concrete obtained from indirect (splitting) tensile tests. *Cement and Concrete Composites*, *57*, 153–165.
- Abrishambaf, A., Barros, J. A., Cunha, V. M., & Frazão, C. M. v. (2017). *Time-dependent fibre pull-out behaviour in self-compacting concrete*.
- Abrishambaf, A., Barros, J. A. O., & Cunha, V. M. C. F. (2015b). Tensile stress-crack width law for steel fibre reinforced self-compacting concrete obtained from indirect (splitting) tensile tests. *Cement and Concrete Composites*, *57*, 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.010>
- ACI 302.1R-04. (2004). *Guide for Concrete Floor and Slab Construction*.
- ACI 360R-06. (2006). *Design of Slabs-on-Ground*.
- ACI 544.1R-96. (2002). *Report on Fiber Reinforced Concrete*.
- ACI 544.2R-89. (1999). Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete. In *ACI* (Vol. 544).
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2019). *Resíduos de Construção e Demolição (RCD)*.
- Agil, R., & Kumar, A. (2018). Experimental Study on Partial Replacement of Cement With Ceramic Tile Powder in Concrete. *International Journal of Scientific & Research*, *9*(3), 1814–1818. <http://www.ijser.org>
- Aiello, M. A., Leuzzi, F., Centonze, G., & Maffezzoli, A. (2009). Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength. *Waste Management*, *29*(6), 1960–1970. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.002>
- Alsaif, A. (2021). Utilization of ceramic waste as partially cement substitute – A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 300). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124009>
- Alsaif, A., Koutas, L., Bernal, S. A., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2018). Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements. *Construction and Building Materials*, *172*, 533–543. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.010>

- Antunes, J. A. B., & Barros, J. A. O. (2003). *Juntas em pavimentos de edifícios industriais*. <https://hdl.handle.net/1822/13124>
- Azevedo, A. F. M., Barros, J. A. O., Sena-Cruz, J. M., & Gouveia, A. v. (2003). *Software in structural engineering education design* (pp. 81–92). III Portuguese-Mozambican Conference of Engineering.
- Barros, J. A. O. (1995). *Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica* [Tese de Doutoramento em Engenharia Civil]. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Barros, J. A. O., Cunha, V. M. C. F., Ribeiro, A. F., & Antunes, J. A. B. (2005). Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 38(1), 47–56. <https://doi.org/10.1617/14058>
- Bhargav, M., & Kansal, R. (2020). Experimental Investigation to Substitute of Cement with Ceramic Tiles Powder in Concrete. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 8(9), 302–307. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2020.31363>
- Boletim Técnico ANAPRE*. (n.d.). Retrieved February 7, 2022, from http://www.anapre.org.br/boletim_tecnico/edicao16.asp
- Brito, J. de. (2012). *Quantificação, composição e Indicadores de Geração de Resíduos de Construção e Demolição*. <https://www.researchgate.net/publication/281376262>
- BS EN 13877-1. (2013). *Concrete pavements - Part 1: Materials*.
- BS EN 13877-2. (2013). *Concrete pavements - Part 2: Functional requirements for concrete pavements*.
- BS EN 14651. (2005). *Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*.
- Butler, L., West, J. S., & Tighe, S. L. (2013). Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. *Construction and Building Materials*, 47, 1292–1301. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.074>
- Caggiano, A., Folino, P., Lima, C., Martinelli, E., & Pepe, M. (2017). On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers. *Construction and Building Materials*, 147, 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.160>

- CCAA T48. (2009). *Guide to industrial floors and pavements : design, construction and specification* (Third edition). Cement Concrete & Aggregates Australia.
- Cristelli, R. (2010). *Pavimentos industriais de concreto: análise do sistema construtivo* [Universidade Federal de Minas Gerais]. <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9ADKHE>
- Cunha, V. M., Barros, J. A., & Sena-Cruz, J. (2008). Modelling the influence of age of steel fibre reinforced self-compacting concrete on its compressive behaviour. *Materials and Structures*, 41(3), 465–478.
- Cunha, V. M., Barros, J. A., & Sena-Cruz, J. M. (2010). Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1), 1–9.
- Cunha, V. M. C. F. (2010). *Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (from Micro-Mechanics to Composite Behaviour)* [Tese de doutoramento]. Universidade do Minho.
- Cunha, V. M. C. F., Sena-Cruz, J. M., & Barros, J. A. O. (2008). *Impact of the fibre manufacturing quality control on the fibre pullout performance*. 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete.
- Deacon, R. C. (1986). *Concrete Ground Floors: Their Design, Construction and Finish: Vol. Volume 48* (Cement and Concrete Association, Ed.; 3rd ed., rev.). Cement and Concrete Association.
- EN 14651. (2005). *Test method for metallic fibre concrete; Measuring the flexural tensile strength (limite of proportionality (LOP), residual)*.
- Ferreira, S. R. (2010). *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares: aplicação às escórias de aciaria nacionais* [Tese de doutoramento]. Universidade do Minho.
- Ferreira, V. J., Sáez-De-Guinoa Vilaplana, A., García-Armingol, T., Aranda-Usón, A., Lausín-González, C., López-Sabirón, A. M., & Ferreira, G. (2016). Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: Technical requirements and environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production*, 130, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.094>
- Frazão, C., Barros, J., & Bogas, J. (2021). Avaliação das potencialidades técnicas e ambientais do betão reforçado com fibras de aço recicladas para aplicações estruturais. *Materiais de Construção/APCMC 196*, 54–57.

- Frazão, C., Díaz, B., Barros, J., Bogas, J. A., & Toptan, F. (2019). An experimental study on the corrosion susceptibility of Recycled Steel Fiber Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, *96*, 138–153. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.011>
- Freire, N. A. (2018). *Resíduos de Construção e Demolição: Redução da geração através da metodologia de P+L* [Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto]. <http://hdl.handle.net/10400.22/14307>
- Freitas, N. E. D. (2017). *Sustentabilidade de estruturas de betão em ambiente marítimo com recurso a FRP*. Universidade do Minho.
- Gaibor, N., Leitão, D., Miranda, T., Cristelo, N., Pereira, E. N. B., & Cunha, V. M. C. F. (2021). Effect of polyacrylonitrile fiber on the properties of alkali-activated ceramic/slag-based mortar. *Journal of Building Engineering*, *44*. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103367>
- Gonçalves, P. C. M. (2007). *Betão com agregados reciclados: análise comentada da legislação existente* [Universidade Técnica de Lisboa]. <https://fenix.ist.utl.pt/dissertacoes/35226>
- Graeff, A. G., Pilakoutas, K., Neocleous, K., & Peres, M. V. N. N. (2012). Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. *Engineering Structures*, *45*, 385–395. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.030>
- Hu, H., Papastergiou, P., Angelakopoulos, H., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2018). Mechanical properties of SFRC using blended Recycled Tyre Steel Cords (RTSC) and Recycled Tyre Steel Fibres (RTSF). *Construction and Building Materials*, *187*, 553–564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.206>
- Husken, G. (2010). *A Multifunctional Design Approach for Sustainable Concrete, with Application to Concrete Mass Products*. Eindhoven University of Technology.
- IEA. (2019). *Global Status Report for Buildings and Construction 2019*. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>
- IS 9284. (2002). *Method of test for Abrasion Resistance of Concrete*.
- João, C. D. A. S. J. (2014). *Pavimentos térreos industriais. Aspetos relevantes ligados à conceção, dimensionamento e às tecnologias de execução*. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/74166>

- Kannan, D. M., Aboubakr, S. H., EL-Dieb, A. S., & Reda Taha, M. M. (2017). High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. *Construction and Building Materials*, *144*, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.115>
- Koroglu, M. A. (2016). MECHANICAL CHARACTERIZATION OF RECYCLED TIRES IN CONCRETE. *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology*, *4*(4), 330–330. <https://doi.org/10.15317/scitech.2016.62>
- Koroğlu, M. A. (2019). Behavior of composite self-compacting concrete (SCC) reinforced with steel wires from waste tires. *Revista de La Construccion*, *17*(3), 484–498. <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.484>
- Leone, M., Centonze, G., Colonna, D., Micelli, F., & Aiello, M. A. (2018). Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behaviour. *Construction and Building Materials*, *161*, 141–155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.101>
- Lima, R. P. A. F. P. (2012). *Utilização de fibras metálicas com funções estruturais em estruturas de betão* [Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. <http://www.fe.up.pt>
- Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A. R., Abdollahnejad, Z., & Illikainen, M. (2018). Characterization and optimization of hardened properties of self-consolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers. *Composites Part B: Engineering*, *151*, 186–200. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.021>
- Miranda, R. J. N. (2014). *Betão com agregados reciclados: estado da arte e análise à gestão e utilização na Região Autónoma da Madeira* [Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira]. <http://hdl.handle.net/10400.13/860>
- Neves, A., Pereira, E. B., Cunha, V., Miranda, T., Rodrigues, M., & Costa, J. (2020). Mechanical Properties of Fibre Reinforced Concrete Incorporating Recycled Tyre Steel Fibres and Industrial by-Products as Aggregates. In *RILEM Spring Convention and Conference* (Vol. 32, pp. 327–338). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76547-7_27
- Nota técnica 52/90. (1990). *Elementos de estudo sobre pavimentos térreos em edifícios industriais*. <http://dspace2.inec.pt:8080/jspui/handle/123456789/1010475>
- NP EN 206. (2013a). *Betão - Especificação, desempenho, produção e conformidade*.

- NP EN 206. (2013b). *Betão - Especificação, desempenho, produção e conformidade*.
- NP EN 1992. (2010). *Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão*. www.ipq.pt
- NP EN 12350-2. (2019). *Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento*.
- NP EN 12390-1. (2012). *Ensaio ao betão endurecido - Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes*.
- NP EN 12390-2. (2009). *Ensaio ao betão endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica*.
- NP EN 12390-3. (2011). *Ensaio ao betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes*.
- NP EN 12390-6. (2011). *Ensaio ao betão endurecido - Parte 6: Resistência à tração por compressão diametral*.
- NP EN 12390-13. (2014). *Ensaio ao betão endurecido - Parte 13: Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão*.
- NP EN 14845-1. (2007). *Métodos de ensaio de fibras no betão - Parte 1: Betões de referência*. www.ipq.pt
- NP EN 14845-2. (2007). *Métodos de ensaio de fibras no betão - Parte 2: Influência sobre a resistência*. www.ipq.pt
- NP EN 14889-1. (2007). *Fibras para betão - Parte 1: Fibras de aço - Definições, especificações e conformidade*. www.ipq.pt
- NP EN 14889-2. (2007). *Fibras para betão - Parte 2: Fibras poliméricas - Definições, especificações e conformidade*. www.ipq.pt
- Nunes, V. A., & Borges, P. H. R. (2021). Recent advances in the reuse of steel slags and future perspectives as binder and aggregate for alkali-activated materials. In *Construction and Building Materials* (Vol. 281). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122605>
- Pacheco, A. E. L. (2012). *Estudo da viabilidade da utilização de escórias de aciaria (ASIC) em betão denso* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. <http://www.fe.up.pt>
- Pacheco, F., & Jalali, T. S. (2010). *A sustentabilidade dos materiais de construção* (Universidade do Minho & TecMinho, Eds.). <http://www.graficavilaverdense.com/>

- Pacheco-Torgal, F. (2013, April 15). *Resíduos de construção e demolição (RCD): enquadramento e breves considerações sobre a localização óptima das estações de reciclagem*. <https://hdl.handle.net/1822/24602>
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 832–838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011, May 3). Betão eco-eficiente: o futuro da indústria do betão pronto. *Betão*. <https://hdl.handle.net/1822/12750>
- Passos, M. T. (2011). *Pavimentos térreos industriais em betão reforçado com fibras de aço* [Tese de mestrado integrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto]. <http://hdl.handle.net/10216/61561>
- Pereira, J. E. M. (2016). *Estruturas de Betão Reforçadas com Materiais Compósitos em Ambiente Marítimo e concebidas com Água do Mar*. Universidade do Minho.
- Pilakoutas, K., Neocleous, K., & Tlemat, H. (2004). Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement. *Engineering Sustainability*, 157(3), 131–138. <https://doi.org/10.1680/ensu.157.3.131.48644>
- Poveda, E., Yu, R. C., Tarifa, M., Ruiz, G., Cunha, V. M., & Barros, J. A. (2020). Rate effect in inclined fibre pull-out for smooth and hooked-end fibres: a numerical study. *International Journal of Fracture*, 223(1), 135–149.
- Rehman, S., Iqbal, S., & Ali, A. (2018). Combined influence of glass powder and granular steel slag on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 178, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.148>
- Ribeiro, R. (2016). *Pavimentos Térreos Industriais Submetidos a Cargas Elevadas*.
- Rodrigues, P. P. F., Boatcini, S. M., & Gasparetto, W. E. (2006). *Manual Gerdau de Pisos Industriais* (PINI, Ed.; 1ª ed.).
- Rooholamini, H., Sedghi, R., Ghobadipour, B., & Adresi, M. (2019). Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 211, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.223>

- Roque, A. J., Gomes Correia, A., Fortunato, E., Pardo de Santayana, F., Castro, F., Ferreira, S., & Trigo, L. (2006). *A GEOTECNIA NA VALORIZAÇÃO DE AGREGADOS SIDERÚRGICOS INERTES RECICLADOS-UM PROJECTO NACIONAL*.
- Samarakoon, S. M. S. M. K., Ruben, P., Wie Pedersen, J., & Evangelista, L. (2019). Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste. *Case Studies in Construction Materials*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00259>
- Saxena, S., & Tembhurkar, A. R. (2018). Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 165, 126–137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.030>
- Simalti, A., & Singh, A. P. (2020). Comparative study on direct shear behavior of manufactured and recycled shredded tyre steel fiber reinforced self-consolidating concrete. *Journal of Building Engineering*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101169>
- Soares, D. A. F. (2014). *Desempenho de betões com agregados grossos reciclados provenientes da indústria de pré-fabricação* [Dissertação de Mestrado]. Instituto Superior Técnico.
- Soltanzadeh, F., Cunha, V. M., & Barros, J. A. (2019). Assessment of different methods for characterization and simulation of post-cracking behavior of self-compacting steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 227, 116–704.
- Tarifa, M., Poveda, E., Cunha, V. M., & Barros, J. A. (2020). Effect of the displacement rate and inclination angle in steel fiber pullout tests. *International Journal of Fracture*, 223(1), 109–122.
- TM 5-809-1/AFM 88-3. (1987). *Concrete floor slabs on grade subjected to heavy loads*.
- TR-34. (2018). *Concrete industrial ground floors : a guide to design and construction*.